

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

IVANA PETRINJAK

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA
ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA
VODOPROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA
ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA
VODOPROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA

ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

Stjepan Strelec, prof.dr.sc.

KANDIDAT:

Ivana Petrinjak

NEPOSREDNI VODITELJ:

Damir Štuhec, dipl. ing. geotehnike

VARAŽDIN, 2018.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

USPOREDBA RAZLIČITIH METODA ODREĐIVANJA
KOEFIČIJENTA VODOPROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA

(naslov završnog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof.dr.sc. Stjepana Streleca**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 10. 09. 2018.

IVANA PETRINJAK

(Ime i prezime)

08090565365

(OIB)

Ivana Petrinjak

(Vlastoručni potpis)

Sažetak: Ivana Petrinjak, Usporedba različitih metoda određivanja koeficijenta vodopropusnosti nekoherentnog tla

Tečenje vode kroz tlo zapravo omogućavaju šupljine koje se nalaze između čvrstih čestica tla. Te šupljine su međusobno povezane, što omogućuje vodi da teče kroz njih. Sposobnost propusnog medija (tla) da propušta vodu definira se preko koeficijenta propusnosti. Sam pojam propusnosti se odnosi na lakoću kojom se bilo koji fluid kreće kroz određeni sloj. Kod ispitivanja vodopropusnosti tla obično se uzima da je voda taj fluid koji teče kroz tlo. Određivanje koeficijenta vodopropusnosti zahtijeva poznavanje svojstva tla. Ona se određuju pomoću laboratorijskih ispitivanja koja obuhvaćaju granulometrijski sastav, oblik zrna, specifičnu gustoću čestica tla te poroznost i saturiranost. Koeficijent vodopropusnosti se u laboratoriju određuje ispitivanjem u permeamtru sa stalnim potencijalom (CHP, Constant Head Permeameter) i permeamtru s padajućim potencijalom (FHP, Falling Head Permeameter). U skladu s vrstom tla odabire se uređaj za ispitivanje koeficijenta vodopropusnosti. Važno je naglasiti da se ovaj rad temelji na ispitivanju u permeamtru sa stalnim potencijalom. U ovom završnom radu žele se usporediti rezultati određivanja koeficijenta vodopropusnosti pijeska korištenjem izravne metode mjerenja u permeamtru sa stalnim potencijalom, s rezultatima dobivenim primjenom različitih empirijskih metoda koje se temelje na svojstvima granulometrijske krivulje ispitivanog materijala.

Ključne riječi: propusnost, koeficijent vodopropusnosti, CHP (permeametar sa stalnim potencijalom), metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti

Sadržaj

1. UVOD	1
2. POSTANAK TLA	2
2.1. Općenito	2
2.2. Struktura tla	2
3. OSNOVNA SVOJSTVA TLA	3
3.1. Trodjelni sustav tla i pokazatelji fizičkih svojstava tla	3
3.2. Porozitet tla	4
3.3. Vlažnost i gustoća tla	5
4. KLASIFIKACIJA TLA	6
4.1. USCS – klasifikacija (Unified Soil Classification System)	9
5. GRANULOMETRIJSKI SASTAV	10
5.1. Određivanje granulometrijskog sastava nekoherentnog tla	10
5.2. Koeficijenti granulometrijske krivulje	11
6. VODA U TLU	12
6.1. Općenito	12
6.2. Oblici pojave vode u tlu	12
7. KRETANJE PODZEMNE VODE	13
7.1. Linearni zakon filtracije	14
7.2. Koeficijent propusnosti	17
8. METODE ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI	20
8.1. Terenska metoda pokusnog crpljenja	20
8.2. Laboratorijske metode	21
8.2.1. Permeametar sa stalnim potencijalom	22
8.2.2. Permeametar s promjenjivim potencijalom	23
9. EMPIRIJSKE METODE ZA PROCJENU KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI	25
9.1. Pregled empirijskih izraza za procjenu koeficijenta vodopropusnosti	26

9.1.1. Hazen	26
9.1.2. Beyer	27
9.1.3 Sauerbrei	27
9.1.4. Terzaghi	28
9.1.5. Kozeny-Carman	28
9.1.6. Seelheim.....	29
10. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI U LABORATORIJU	30
10.1. Granulometrijska analiza	30
10.2. Određivanje koeficijenta vodopropusnosti u permeamtru sa stalnim potencijalom.....	32
10.2.1. Ugradnja uzorka i priprema za ispitivanje	33
10.2.2. Postupak ispitivanja	36
10.2.3. Obrada rezultata mjerenja i računanje koeficijenta vodopropusnosti.....	37
11. PROCJENA KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI POMOĆU EMPIRIJSKIH IZRAZA.....	40
12. USPOREDBA VRIJEDNOSTI KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA DOBIVENIH RAZLIČITIM METODAMA ODREĐIVANJA	41
13. ZAKLJUČAK.....	43
14. LITERATURA	44
15. POPIS SLIKA.....	46
16. POPIS TABLICA	47

1. UVOD

Tema ovog završnog rada obrađuje hidrauličku vodljivost tla, čija su fizikalna svojstva presudna za njegovu propusnost. Također se opisuje mjerenje koeficijenta propusnosti koje se obavlja na terenu ili u geotehničkim laboratorijima gotovo pri svakom ozbiljnijem inženjerskom zahvatu. O njegovoj složenosti zavisi i potrebna točnost određivanja hidrauličke vodljivosti odnosno koeficijenta propusnosti.

Dio rada predstavlja sažetak potrebnih predznanja hidrauličke vodljivosti tla kako bi se lakše shvatile različite empirijske metode njezinog određivanja. Potreba za vrlo točnim određivanjem propusnosti tla javila se u posljednje vrijeme prilikom rješavanja problema zbrinjavanja otpada.

Obzirom na značaj tog svojstva tla, s vremenom su razvijeni posebni uređaji i metode za pripremu i ispitivanje hidrauličke vodljivosti na uzorcima tla u laboratoriju.

Općenito, postoje tri metode ispitivanja koeficijenta propusnosti u laboratoriju – sa stalnim potencijalom, s promjenjivom razlikom potencijala te zadanim protokom. U ovom radu je posebno istaknuto ispitivanje koeficijenta propusnosti nekoherentnog tla za što se koriste samo prve dvije metode (druga metoda samo ako nekoherentno tlo sadrži veću količinu praha).

„U inženjerskim praksama, poteškoće s tlima gotovo isključivo nisu rezultat samih tla, nego i vode sadržane u njihovim prazninama. Na planeti bez vode ne bi bilo potrebe za mehanikom tla ”

Karl von Terzaghi, 1939.

2. POSTANAK TLA

2.1. Općenito

Tlo je nastalo kao posljedica rastrošbe Zemljine kore pod utjecajem atmosferilija. To je skupno ime za čimbenike koji utječu na rastrošbu stijenske mase, a što je početak stvaranja tvorevine koja se naziva **tlo**.

Čimbenici rastrošbe dijele se na:

- **Mehaničke** čimbenike:
 - tektonske sile, voda, led, abrazija, vegetacija
- **kemijske** čimbenike:
 - oksidacija, karbonizacija, hidratizacija, desilikacija, otapanje [1]

2.2. Struktura tla

Struktura tla je nakupina različito složenih čvrstih čestica i pora. Različiti oblici i veličine čvrstih čestica uvjetuju i različit način slaganja čestica u pojedinim vrstama tla. Mogućnost analize pod elektronskim mikroskopom osvijetlila je i oblik i veličinu pora u tlu. Uočljivo je da su pore različitih veličina, da se nalaze među zrnima ali i među nakupinama čestica.

Najsitnije čestice koherentnih materijala talože se u mirnoj vodi. Prilikom taloženja čestice različitih naboja se pod utjecajem elektrokemijskih sila spojaju u veće nakupine koje se nazivaju **flokule**. Nakupine se talože na dno. Na taj način nastaje rahla struktura tla sastavljenog od čestica koherentnog materijala i velikog volumena među česticama. Takva je struktura **saćasta** ili još rahlija **pahuljasta**.

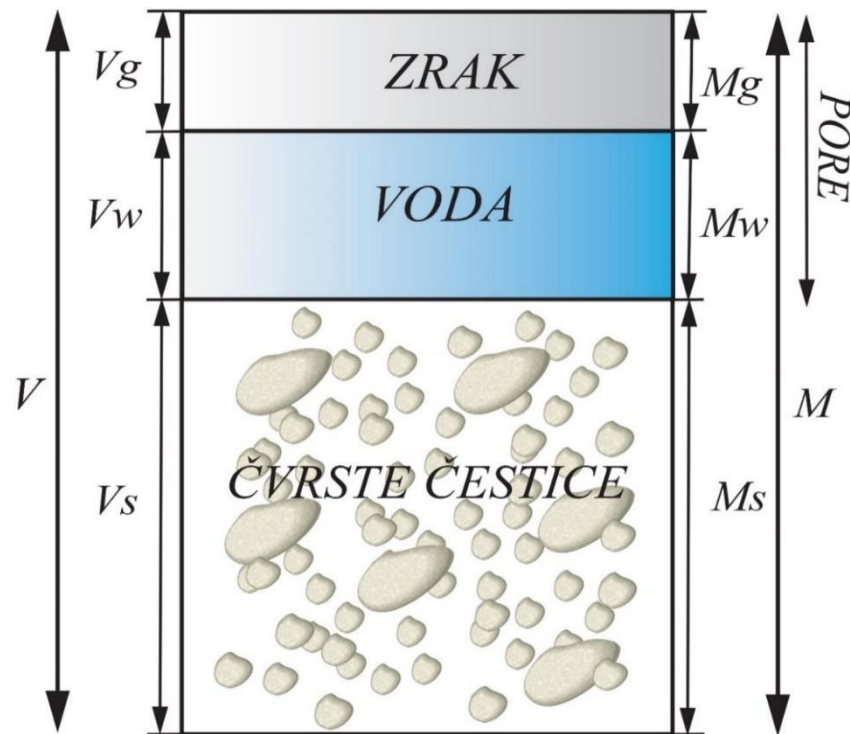
Mrvičasta struktura nastaje obično kao sekundarna pojava u najgorenjem sloju, utjecajem atmosferilija /voda, smrzavica, sunce itd./ zatim djelovanjem životinja i biljaka. Tlo sa mrvičastom strukturom sastoji se od većih ili manjih mrvica i grudica sa velikim šupljim međuprostorima.

Zrnata struktura sastoji se od pojedinačnih zrnaca više ili manje kompaktnog oblika. Sva dobro nosiva građevna tla imaju većinom zrnatu strukturu. [3]

3. OSNOVNA SVOJSTVA TLA

3.1. Trodjelni sustav tla i pokazatelji fizičkih svojstava tla

Tlo se sastoji od čestica različite krupnoće i od međuprostora – pora. Na slici 1. prikazana je shema trodjelnog sustava tla. Jedinični volumen tla u prirodi se može podijeliti na volumen čvrstih čestica i volumen pora. Volumen pora se dalje dijeli na dio pora ispunjen vodom i dio pora ispunjen zrakom.



Slika 1. Trodjelni sustav tla

Oznake na slici 1. su:

V – ukupni volumen uzorka

V_v – volumen pora (engl. „voids“)

V_s – volumen čvrstih čestica (engl. „solids“)

V_g – volumen plina (engl. „gas“), plin (zrak) se u praktičnim problemima zanemaruje

V_w – volumen vode (engl. „water“)

M – ukupna masa uzorka

M_g – masa plina, plin (zrak) se u praktičnim problemima zanemaruje

M_w – masa vode

M_s – masa čvrstih čestica

Na osnovi slike 1. vrijede jednakosti:

$$1) \quad V = V_s + V_v$$

$$V_v = V_w + V_g \rightarrow V = V_s + V_w + V_g$$

$$2) \quad M = M_s + M_w + M_g$$

$$M_g \approx 0 \quad M = M_s + M_w$$

3.2. Porozitet tla

Svako tlo sadrži u sebi šupljine ili pore u većem ili manjem opsegu. Prirodnog tla bez pora nema. Pore u tlu sadrže samo zrak ako je tlo potpuno suho, samo vodu ako je tlo zasićeno vodom ili djelomično vodu i zrak zajedno. Veličina pora u tlu nije konstantna već ovisi o **tlaku** pod kojim se tlo nalazi i o trajanju tog tlaka. Što je tlak na tlo jači to će se tlo u većoj mjeri zgusnuti, a volumen pora smanjiti. Smanji li se tlak na tlo to će se ono do određene mjere elastično rastezati, a volumen pora će se povećati.

Porozitet ima veliki utjecaj na mehanička svojstva tla, naročito na stišljivost tla. Porozitet tla iskazuje se indeksom poroziteta (n) i koeficijentom pora (e).

Porozitet (n , *apsolutni porozitet*) je omjer volumena pora i ukupnog volumena tla. Obično se izražava u postocima.

Koeficijent pora (e , *relativni porozitet*) je omjer volumena pora i volumena čvrstih čestica tla. Izražava se pomoću decimalnog broja, a može biti veći od 1.

Navedena svojstva tla mogu se izraziti kao:

$$\text{apsolutni porozitet} \quad n = \frac{\text{volumen pora}}{\text{ukupni volumen}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

$$\text{koeficijent pora} \quad e = \frac{\text{volumen pora}}{\text{volumen čvrstih čestica}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Veza poroziteta i koeficijenta pora je:

$$\text{apsolutni porozitet} \quad n = \frac{e}{1+e} \quad (3)$$

$$\text{koeficijent pora} \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (4)$$

Stupanj zasićenja (S_r , *stupanj saturacije*) je omjer volumena vode (V_w) i volumena pora (V_v) u uzorku. Definira koliki je dio volumena pora ispunjen vodom. Može biti od $S_r = 0$ kada je tlo potpuno suho, do $S_r = 1$ (100%) kada su sve pore zasićene vodom.

$$S_r = \frac{\text{volumen vode}}{\text{volumen pora}} = \frac{V_w}{V_v} \cdot [100 \text{ \%}] \quad (5)$$

3.3. Vlažnost i gustoća tla

Vlažnost tla (w) definira se kao odnos mase vode i mase suhog tla. Obično se iskazuje u postocima.

$$w = \frac{\text{masa vode}}{\text{masa suhog tla}} = \frac{M_w}{M_d} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (6)$$

Potpuno suho tlo nema vlažnost ($w = 0\%$). Vodene suspenzije tla teoretski imaju beskonačnu vlažnost ($w = \infty$).

Gustoća tla (ρ) definira se kao odnos mase i ukupnog volumena tla.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (7)$$

U laboratoriju se najčešće određuje vaganjem mase uzorka i određivanjem volumena uzorka mjerenjem njegovih dimenzija.

Suha gustoća tla (ρ_d) definira se kao odnos suhog tla i ukupnog volumena tla.

$$\rho_d = \frac{M_d}{V} \quad (8)$$

Gustoća čvrstih čestica tla (ρ_s) definirana je odnosom mase čvrstih čestica tla i volumena čvrstih čestica tla.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (9)$$

Gustoća čvrstih čestica određuje se u laboratoriju pomoću piknometra. Vrijednost gustoće čvrstih čestica tla kreće se u uskom rasponu vrijednosti, uobičajeno između 2,6 g/cm³ i 2,8 g/cm³.

Navedene gustoće tla mogu se iskazati i kao **volumne težine tla**, množenjem gustoće s gravitacijskim ubrzanjem $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Tada vrijede relacije:

$$\text{volumna težina} \quad \gamma = \rho \cdot g \quad (10)$$

$$\text{volumna težina suhog tla} \quad \gamma_d = \rho_d \cdot g \quad (11)$$

$$\text{volumna težina zasićenog tla} \quad \gamma_{sat} = \rho_{sat} \cdot g \quad (12)$$

Volumna težina tla iskazuje se obično u kN/m³. [1]

4. KLASIFIKACIJA TLA

Tlo je prirodna mješavina mineralnih zrna koje se dijele na dvije osnovne grupe, krupnozrnata i sitnozrnata tla. U geomehanici postoji nekoliko načina klasificiranja tla od kojih su neki opće prihvaćeni, a neki se koriste ograničeno ili su napušteni. Klasifikacija tla služi da se tla mogla međusobno razlikovati i uspoređivati. Također olakšava sporazumijevanje među korisnicima geotehničkih podataka jer je međunarodno prihvaćena i koristi se s manjim preinakama u cijelom svijetu.

Krupnozrnata tla su ona tla kod kojih čestice u suhom stanju nisu međusobno vezane. Na njih dominantno djeluju sile gravitacije i u nekim slučajevima kapilarne sile. Pojedino se zrno iz mase može izdvojiti npr. sijanjem.

Sitnozrnata tla imaju svojstvo da im se čestice ne mogu pojedinačno izdvojiti osim ako se razmute u vodi. Na čestice sitnozrnatog tla dominantno djeluju elektrokemijske sile između minerala i iona vode koja je kemijski vezana na mineralnu rešetku. Svojstva im bitno ovise o količini vode vezanoj u mineralnu rešetku.

Prema veličini odnosno promjeru zrna najviše se koristi podjela prema USC (Unified Soil Classification) sustavu i podjela veličine zrna prema MITu (Massachusetts Institute of Technology) koja je uobičajena u domaćoj praksi. [6]

Tablica 1. Podjela tla prema veličini zrna [6]

VRSTA TLA		PROMJER ZRNA [mm]		SIMBOL
		prema USC sustavu	prema MIT-u	
KRUPNOZRNATO TLO	Šljunak	> 4,75	60 - 2	G
	Pijesak	4,75 - 0,075	2 – 0,06	M
SITNOZRNATO TLO	Prah	< 0,075	0,06 – 0,02	S
	Glina		< 0,02	C

Krupnozrnata tla: sadrže preko 50% zrna većih od 0,075 mm odnosno 0,06 mm

Sitnozrnata tla: sadrže preko 50% zrna manjih od 0,075 mm odnosno 0,06 mm

Detaljnija podjela tla prema veličini zrna po MIT-u prikazana je u Tablici 2.

Tablica 2. Klasifikacija tla prema promjeru zrna prema MIT-u [6]

OPIS				NAZIVNI PROMJER [mm]	TLO PREMA RAZREDBI
ZRNA	KRUPNA	KAMEN		više od 60	KRUPNOZRNATO TLO
		ŠLJUNAK	KRUPAN	60 - 20	
			SREDNJI	20 - 6	
			SITAN	6 - 2	
		PIJESAK	KRUPAN	2 – 0,6	
			SREDNJI	0,6 – 0,2	
			SITAN	0,2 – 0,06	
	SITNA	PRAH	KRUPAN	0,06 – 0,02	SITNOZRNATO TLO
			SREDNJI	0,02 – 0,006	
			SITAN	0,006 – 0,002	
		GLINA		manje od 0,002	

Postoje 4 osnovne podijeje grupa tla prema veličini zrna:

Šljunak se sastoji od mineralnih zrna i fragmenata stijena većih od 2 mm. Simbol **G** za šljunak dolazi od engleskog naziva za šljunak – *Gravel*.

Pijesak se sastoji od mineralnih zrna i fragmenata stijena razne veličine koji prolaze sitom otvora 2 mm, a zaustavljaju se na situ otvora 0,06 mm. Zrno veličine 0,06 mm je približno najmanje koje se još može raspoznati golim okom. Simbol **S** za pijesak dolazi od engleskog naziva za pijesak – *Sand*.

Prah se sastoji od čestica većih od 0,002 mm, a manjih od 0,06 mm. Simbol **M** za prah dolazi od švedske riječi *Myala*.

Glina se sastoji od čestica manjih od 0,002 mm. Simbol **C** za glinu dolazi od engleskog naziva za glinu – *Clay*.

Posebnu grupu tla čine:

Organsko tlo se sastoji od raspadnutih biljnih tvari koje su fino raspodijeljene. Simbol **O** dolazi od engleskog naziva za organsko - *Organic*.

Treset je vlaknasto močvarno tlo. Simbol **Pt** dolazi od engleskog naziva za treset – *Peat*.

Graduiranost krupnozrnatog tla izračunava se iz karakteristika granulometrijske krivulje koje se određuju pomoću vrijednosti koeficijenta jednoličnosti C_U i koeficijenta zakrivljenosti C_C (Tablica 3).

Tablica 3. Graduiranost krupnozrnatog tla [6]

Graduiranost	Uvjeti graduiranosti	Oznaka
dobra	$C_U > 4$ za šljunak; $1 < C_C < 3$	W
	$C_U > 6$ za šljunak; $1 < C_C < 3$	
slaba	Ako vrijednost C_U i/ili C_C ne zadovoljavaju uvjete	P

4.1. USCS – klasifikacija (Unified Soil Classification System)

Temelji se na Cassagrande-ovoj podjeli, s određenim preinakama. Dobila je naziv Unified Soil Classification System (USCS).

Osnovne grupe tla čine:

Krupnozrnata tla:

G - šljunak (više od 50% u ukupnoj masi ima šljunka)

S – pijesak (više od 50% u ukupnoj masi ima pijeska)

Sitnozrnata tla:

M – prah (IP ispod "A" linije ili $IP < 4$);

C – glina (IP iznad "A" linije ili $IP > 7$);

O – organsko tlo (IP ispod "A" linije ili $IP < 4$).

Za podgrupe su sljedeće oznake:

Za krupnozrnat materijale:

- s manje od 5% čestica manjih od 0,075 mm, odnosno 0,06 mm:

W – dobro graduirano ($C_U > 4$ za šljunke; $C_U > 6$ za pijeske; $1 < C_C < 3$);

P – slabo graduirano (nije zadovoljen jedan ili oba uvjeta)

- koji sadrže 5 % do 12 % čestica većih od 0,075 mm, odnosno 0,06 mm koriste se uz glavne i dodatne oznake:

GC ili **SC** – s glinom

GM ili **SM** – s prahom.

- koji sadrže više od 12% čestica većih od 0,075 mm, odnosno 0,06 mm:

C – s glinom

M – s prahom.

Za sitnozrnat materijale:

H – visoko plastični ($w_L > 50\%$)

L – nisko plastični ($w_L < 50\%$). [6]

5. GRANULOMETRIJSKI SASTAV

Granulometrijski sastav je, za neki uzorak tla odnos svih razreda promjera zrna i njihovih postotaka masa. Prikazuje se granulometrijskom krivuljom u dijagramu polulogaritmanskog mjerila, kod kojeg je na osi apscisa promjer zrna D [mm] u logaritmanskom mjerilu, a na osi ordinata u linearnom mjerilu prolazi kroz sito određenog otvora u postocima.

Već se samo na temelju granulometrijskog sastava mogu približno odrediti neke fizikalne karakteristike tla kao primjerice:

- vodopropusnost;
- stišljivost;
- kapilarnost;
- filtarska svojstva;
- osjetljivost na smrzavanje;
- nosivost;
- podložnost eroziji,
- uporabljivost određene mehanizacije itd.

Postupci za određivanje granulometrijskog sastava su:

Sijanje – za čestice veće od 0,06 mm;

Areometriranje (sedimentiranje čestica u vodi) – za čestice manje od 0,06 mm;

Kombinirana analiza – ako materijal sadrži i krupne i sitne frakcije. [9] [12]

5.1. Određivanje granulometrijskog sastava nekoherentnog tla

Provodi se sijanjem, suhim ili mokrim postupkom. Za sijanje se koristi niz sita, čiji se otvori oka smanjuju na svakom slijedećem situ (odozgo prema dolje).

Pri suhom postupku sijanja, određena količina prethodno ispranog i osušenog uzorka sipa se na sito najvećeg otvora oka u nizu sita koja su postavljena jedno iznad drugog u tresilicu. Sita s uzorkom se tresu 10 do 15 min. Nakon toga se važe ostatak na svakom situ, te materijal koji je prošao kroz najfinije sito m_p (uhvaćen u zdjelu na dnu). Mjere se dimenzije najvećeg zrna i izračunava postotni udio pojedine veličine zrna u

ukupnoj masi ispitivanog uzorka. Podaci se zatim ucrtavaju u granulometrijski dijagram a njihovim spajanjem dobije se granulometrijska krivulja. [9] [12]



Slika 2. Shematski prikaz sijanja [12]



Slika 3. Sita s obzirom na veličinu otvora [9]



Slika 4. Niz sita pričvršćenih na tresalicu [9]

5.2. Koeficijenti granulometrijske krivulje

Za ocjenu graduiranosti granulometrijskog sastava tla definiraju se dva koeficijenta: koeficijent jednoličnosti (C_U) i koeficijent zakrivljenosti (C_C). Oni se definiraju na temelju karakterističnih vrijednosti promjera zrna.

D_{10} - efektivni promjer zrna, promjer sita kroz kojeg prolazi posljednjih 10 % mase ispitanog uzorka

D_{30} , D_{60} – promjer sita kroz kojeg prolazi 30 % odnosno 60 % ukupne količine uzorka. [12]

$$\text{koeficijent jednoličnosti} \quad C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (13)$$

$$\text{koeficijent zakrivljenosti} \quad C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (14)$$

6. VODA U TLU

6.1. Općenito

U trodijelnom sastavu tla voda ima odlučujući utjecaj na njegovo ponašanje. Počevši od kapilarnog dizanja preko bubrenja i utjecaja mraza na tlo, do tečenja vode niz kosine, kroz brane i ispod građevina, pa do slijeganja građevina temeljenih na glini, stabilnosti pijeska pri potresu i pojavi likvefakcije. Voda je neizbježan, sastavni dio tla. [3]

6.2. Oblici pojave vode u tlu

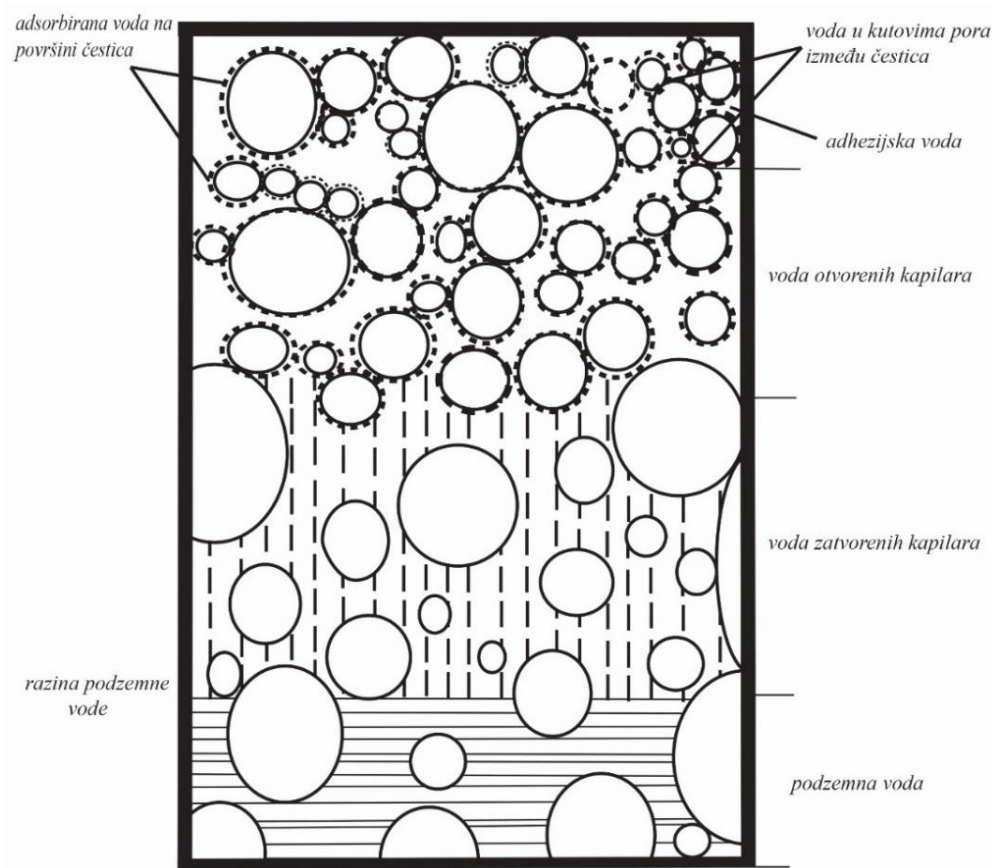
Promatrajući pore u tlu može se uočiti da mogu biti djelomično ili potpuno ispunjene vodom.

Kada u tlu postoji prostor u kojem su sve pore ispunjene vodom, u njemu djeluje hidrostatski tlak. Ovaj je prostor omeđen plohom koja se naziva **razina podzemne vode** (RPV). Na njoj je tlak jednak atmosferskom tlaku. U podzemnoj vodi tlak je veći od atmosferskog. Iznad RPV nalazi se zona tla potpuno zasićenog vodom, u kojoj vlada negativni porni tlak (manji od atmosferskog), nastao pojavom kapilarnih sila između pora tla i vode – to je zatvorena **kapilarna voda**. Iznad zatvorene kapilarne vode nalazi se zona tla djelomično zasićena vodom u kojoj i dalje vladaju kapilarne sile. To je područje u kojem se nalazi **otvorena kapilarna voda**. Ako razina otvorene kapilarne vode ne seže do površine terena, u tom slučaju se iznad nje nalazi **adhezijska voda**. Područja pojave vode u tlu prikazana su u tablici 4. [3] [9]

Tablica 4. Područja pojave vode u tlu [3]

ADHEZIJSKA VODA	Voda obavija minerale tla u vrlo tankom sloju koji je vezan na mineral elektrokemijskim silama, nema kapilarnih učinaka.
OTVORENA KAPILARNA VODA	Na dodirima čestica postoje kapilarni meniskusi koji drže čestice zajedno, stupanj zasićenosti je bitno ispod 100%.
ZATVORENA KAPILARNA VODA	Porni tlak je negativan, stupanj zasićenosti blizu 100%.
PODZEMNA VODA	Porni tlak je jednak hidrostatskom, a na razini podzemne vode jednak atmosferskom, stupanj zasićenosti je približno jednak 100%.

Na slici 5. dat je shematski prikaz pojave vode u tlu



Slika 5. Shematski prikaz vode u tlu [2]

7. KRETANJE PODZEMNE VODE

Voda u podzemlju potječe od infiltracije površinskih voda (meteorska voda), kondenzacije vodene pare iz unutrašnjosti zemlje (juvenilna voda), ili se zadržavala u stijeni iz vremena njena nastanka (konatna voda).

Jednom infiltrirana meteorska voda u podzemlju uglavnom se dalje giba, a s obzirom na silu koja uzrokuje to gibanje razlikujemo:

- **Pelikularni tok** koji je uzrokovan molekularnim silama privlačenja između čestica tla i vode i to je zapravo širenje vlažnog omotača ili filma oko suhih čestica stijene ili tla.

- **Kapilarni tok** je tok znatno brži od pelikularnog a rezultat je utjecaja površinskog fluida, sile gravitacije i molekularnih sila privlačenja čestica vode i tla.
- **Gravitacijski tok** se odvija uslijed hidrauličkog gradijenta. Gravitacijski tok može biti laminaran i turbulentan. **Laminaran tok** je uvjetovan malim brzinama i on je karakterističan za tok vode u primarno poroznim stijenama i u sekundarno poroznim, tj. raspucalim stijenama i sitnozrnatim tlima gdje pukotine odnosno pore nisu velikih dimenzija. **Turbulentni tok** ima puno veću brzinu i karakterističan je za površinske tokove, za stijene s pukotinskom poroznošću ili krupnozrnata tla gdje su dimenzije pukotina odnosno pora velike. [5]

7.1. Linearni zakon filtracije

Temeljni zakon koji opisuje laminarni tok vode u poroznoj sredini ustanovljen je empirijski (Darcy 1865.) i naziva se Darcy-jev zakon. To je osnovni izraz koji opisuje strujanje podzemne vode.

Francuski inženjer Henry Darcy ustanovio je da je strujanje vode kroz tlo analogno strujanju vode u cijevima. On je obavio niz ispitivanja na vertikalnoj cijevi koja je bila ispunjena pijeskom. Utvrdio je da je brzina toka kroz stupac zasićenog pijeska proporcionalna razlici hidrauličkog potencijala na krajevima stupca tj. obrnuto proporcionalna dužini stupca (Slika 6.).

$$\text{Darcyjeva brzina} \quad v = k \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (15)$$

gdje je:

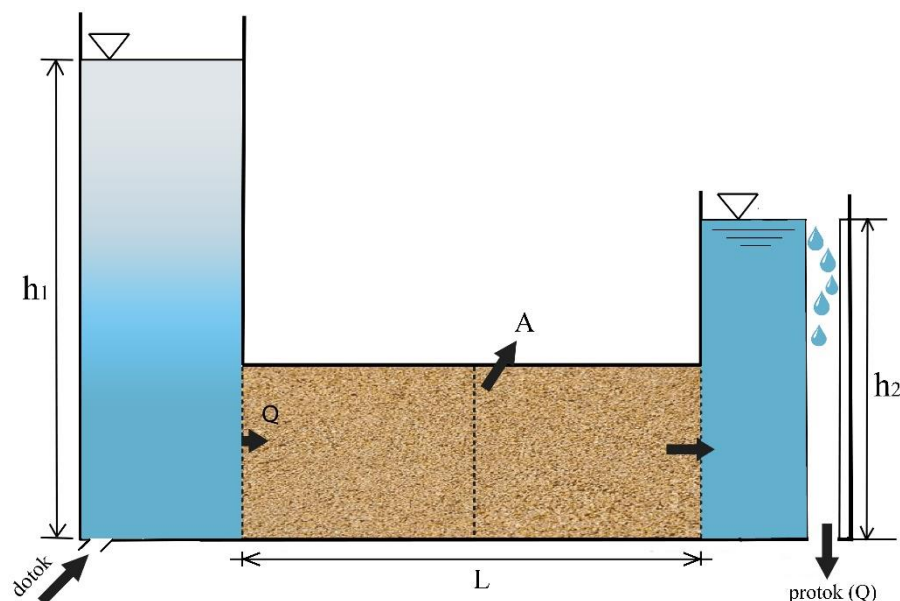
v - Darcyjeva brzina toka

$(h_1 - h_2)$ - razlika u hidrauličkom potencijalu

L - dužina linije toka od točaka na kojima su izmjerene vrijednosti h_1 i h_2

k - koeficijent propusnosti

Vrijednost v naziva se Darcy-jevom brzinom toka zato što se pretpostavlja da do strujanja dolazi po čitavom materijalnom presjeku iako zapravo veliki dio tog presjeka zauzimaju krute čestice. [5]



Slika 6. Shematski prikaz Darcy-jeve aparature

Darcy-jev eksperiment pokazuje da tok u zasićenom pijesku izravno ovisi o hidrauličkom gradijentu. Ako se hidraulički gradijent (gubitak potencijala po jedinici dužine toka) udvostruči tada će se i brzina toka u pijesku također udvostručiti. S druge strane, da bi se udvostručila brzina toka treba se udvostručiti i hidraulički gradijent. Treba naglasiti da ti odnosi vrijede samo za laminarno strujanje. U slučaju turbulentnog strujanja, brzina strujanja ne mijenja se proporcionalno sa hidrauličkim gradijentom: udvostručavanjem hidrauličkog gradijenta brzina protoka može se povećati samo za 1,5 puta.

Razlika hidrauličkih potencijala ($h_1 - h_2$) podijeljena sa dužinom L , linijom tečenja, naziva se hidraulički gradijent i :

$$\text{hidraulički gradijent} \quad \frac{h_1 - h_2}{L} = i \quad (16)$$

Preko hidrauličkog gradijenta može se izraziti *Darcy-jev zakon* kao:

$$v = k \cdot i \quad (17)$$

Odnos Q/A predstavlja *jedinični ili specifični protok* q koji se često naziva i prividna ili Darcy-jeva brzina v :

$$\frac{Q}{A} = q = v = k \cdot i \quad (18)$$

Poznato je da je *protok* (Q), jednako umnošku brzine toka i površine presjeka (A), ili:

$$Q = v \cdot A \quad (19)$$

Ako zamijenimo brzinu s odgovarajućom vrijednosti v dobijemo:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (20)$$

Protok (Q) je količina istjecanja (volumen V) u jedinici vremena (t), a obično se izražava u kubnim metrima u sekundi [m^3/s].

$$Q = \frac{V}{t} \quad (21)$$

Kako je hidraulički gradijent bezdimenzionalna veličina, iz izraza (16) slijedi da koeficijent propusnosti ima dimenziju brzine, odnosno kada je hidraulički gradijent jednak jedinici, koeficijent propusnosti je jednak brzini filtracije.

Brzina filtracije koja se dobije iz linearnog zakona filtracije nije stvarna brzina toka. Presjek površine toka (A) nije, u slučaju poroznog medija neto površina toka, jer ga sačinjavaju kako površine pora tako i površine čvrstih čestica. Prema tome je tako izračunata brzina filtracije **prividna brzina** i manja je od stvarne brzine protjecanja tekućine.

Stvarna brzina protjecanja (v') je:

$$v' = \frac{Q}{A \times n_{ef}} \quad (22)$$

$$v' = \frac{v}{n_{ef}} \quad (23)$$

gdje je:

Q – protok

n_{ef} - efektivna poroznost sloja

A - površina poprečnog presjeka

Maksimalna brzina toka v'_{\max} približno je dva puta veća od izračunate v' . U slučaju kada je efektivna poroznost $n_e = 1/3$, prosječna je stvarna brzina $v' = 3v$, a maksimalna $v'_{\max} = 6v$ (Wilson 1969.). [5]

7.2. Koeficijent propusnosti

Prema Darcyjevom zakonu, brzina strujanja vode kroz tlo (v) odnosno specifični protok (q) je proporcionalan hidrauličkom gradijentu, a konstantom proporcionalnosti se definira koeficijent propusnosti (k). [11]

$$k = \frac{v}{i} \quad (24)$$

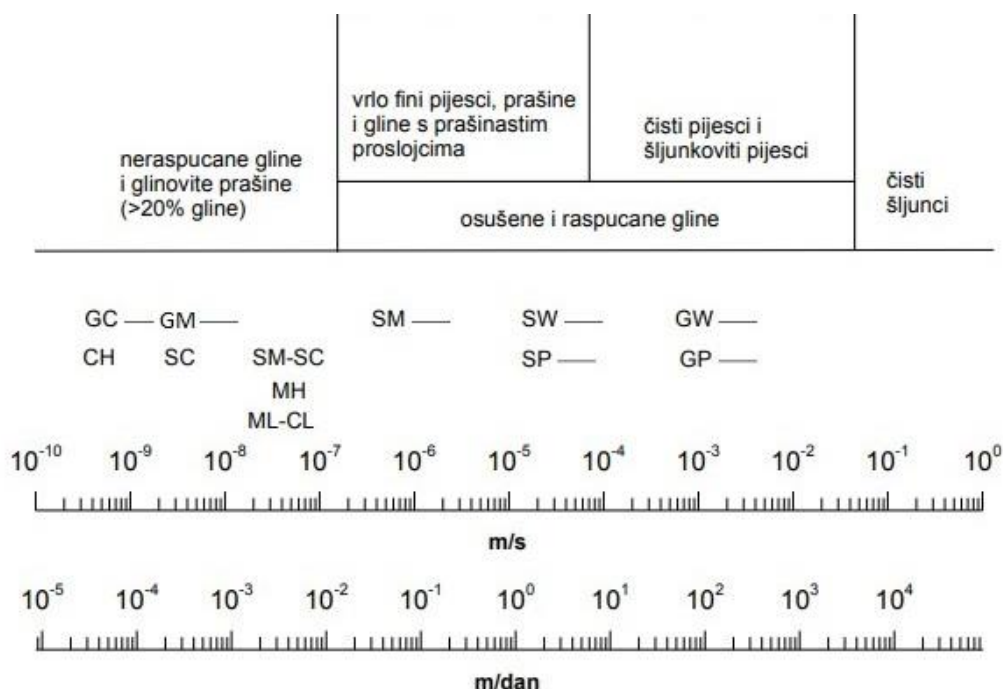
gdje je:

k – koeficijent propusnosti

v – brzina strujanja vode kroz tlo

i – hidraulički gradijent

Koeficijent propusnosti ima dimenziju brzine, a najčešće se iskazuje u cm/s ili m/s. To je osnovni parametar za strujanje vode kroz tlo a zavisno o vrsti tla varira u rasponu od preko 10 redova veličina (slika 7.). [11]



Slika 7. Prikaz okvirnih vrijednosti koeficijenta propusnosti k [18]

Niti za određenu vrstu tla koeficijent propusnosti nije konstantan, već zavisi o svojstvima poroznog medija.

Koeficijent propusnosti k zavisi od slijedećih čimbenika:

1. k zavisi o veličini zrna. Ukoliko su zrna veća, veće su i pore između njih. Što su manje čestice, manje su šupljine između njih, pa se povećava i otpor toku vode kroz te šupljine. Veličina efektivnog zrna D_{10} važna je u tom pogledu. Ova zavisnost se može napisati u obliku $k = f(D^2)$ gdje je D veličina zrna. Eksperimentalna istraživanja propusnosti pijeska koje je proveo Hazen (1911.) su pokazala da se u njegovom slučaju dobiveni rezultati mogu opisati empirijskim izrazom:

$$k = C(D_{10})^2 \quad (25)$$

Izraz (25) vrijedi za rastresite jednolične pijeske uz uvjet da je $D_{10} > 0,05$ mm i kod kojih je koeficijent jednoličnosti $C_U < 5$.

2. k zavisi o koeficijentu pora. Koeficijent propusnosti opada sa povećanjem zbijenosti tla, tj. sa smanjenjem pora. Za pijeske se ova zavisnost može napisati kao:

$$k = a \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (26)$$

gdje je e koeficijent pora, dok je a konstanta za dano tlo. Na primjer, u pijescima odnos koeficijenta propusnosti pri minimalnoj i maksimalnoj zbijenosti rijetko prelazi vrijednost od oko 3.

3. k zavisi o viskozitetu vode koja pak zavisi o temperaturi. Povećanjem temperature raste i viskoznost vode, što utječe na izmjerenu vrijednost propusnosti. Uobičajeno je da se rezultati prikazuju za standardnu temperaturu $T = 20^\circ\text{C}$, što ne isključuje mogućnost da se ispitivanja i analize vrše i pri nekim drugim temperaturama. [9]

Tablica 5. Prikaz zavisnosti koeficijenta propusnosti k_T na temperaturi T u odnosu na koeficijent propusnosti k_{20} , pri temperaturi od 20°C

$T (^{\circ}\text{C})$	30	20	15	10	5
k_T/k_{20}	1,25	1,00	0,87	0,77	0,66

4. k zavisi o obliku zrna, njihovoj raspodjeli i povezanosti, tj. o strukturi tla.

Ovaj čimbenik se teško može kvantificirati. Izdužene ili nepravilne čestice tvore šupljine kroz koje teče voda, a koje su mnogo teže propusne nego šupljine oko gotovo zaobljenih čestica. Čestice sa grubom površinom pružaju veći otpor toku vode nego glatke čestice. Oba efekta mogu smanjiti brzinu strujanja vode kroz tlo, a time i propusnost tla. [9]

5. k zavisi o količini zraka u porama. Prisustvo zraka smanjuje propusnost.

Mjehurići zraka mogu blokirati protjecanje između čvrstih čestica i time jako smanjiti propusnost tla. Ako je *stupanj saturacije* manji od 85%, vjerojatno je da se zrak u porama tla ne nalazi u mjehurićima, već je ravnomjerno raspoređen.

6. U koherentnim tlima *mineralni sastav* je važan čimbenik jer različite vrste

minerala zadržavaju različite količine vode. Zbog zadržavanja vode u nekim mineralima može doći do bubrenja, pa i efektivne veličine pora različito variraju. Zbog tog razloga mineralni sastav jako utječe na propusnost glina, ali ima malog utjecaja na propusnost šljunka i pijeska. [12]

Prema stupnju propusnosti određenom kroz vrijednosti koeficijenta propusnosti, tlo se može klasificirati na način prikazan u tablici 6.

Tablica 6. Klasifikacija tla prema propusnosti [9]

Stupanj propusnosti	Vrijednosti koeficijenta propusnosti k [m/s]
<i>Visoki</i>	<i>Veći do 10^{-3}</i>
<i>Srednji</i>	<i>$10^{-3} - 10^{-5}$</i>
<i>Niski</i>	<i>$10^{-5} - 10^{-7}$</i>
<i>Vrlo niski</i>	<i>$10^{-7} - 10^{-9}$</i>
<i>Praktički nepropustan</i>	<i>Manje od 10^{-9}</i>

8. METODE ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI

U daljnjim razmatranjima govorit će se o određivanju koeficijenta propusnosti tla u geotehničkom inženjerstvu, gdje se kao tekući medij pojavljuje podzemna voda. Stoga će se u daljnjem tekstu umjesto izraza *koeficijent propusnosti* koristiti izraz *koeficijent vodopropusnosti*.

Postoji više vrsta metoda za određivanje koeficijenta vodopropusnosti, a najčešće korištene su:

1. terenske metode pokusnog crpljenja, gdje se određuje transmisivnost, a dijeljenjem s debljinom sloja određuje *koeficijent propusnosti k*
2. laboratorijske metode – pomoću raznih tipova permeametara
3. metode koje se temelje na empirijskim izrazima uz korištenje podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine.

Odabir metode ovisi o cilju istraživanja i raspoloživim sredstvima. Najtočnija i najskuplja metoda je metoda pokusnog crpljenja. [19]

8.1. Terenska metoda pokusnog crpljenja

Postupak pokusnog crpljenja odnosi se isključivo na propusne vodonosne naslage, koje su važne za pridobivanje vode s ciljem vodoopskrbe. Velika prednost ove metode je što se tlo ili stijena ispituju u neporemećenoj okolini. Zato, ako tlo ima sekundarnu propusnost zbog pukotina ili sadrži korijenje, test će uključivati njihov utjecaj na izmjerenu hidrauličku vodljivost odnosno koeficijent vodopropusnosti.

Kod ove metode poznate su vrijednosti piezometarskih razina, odnosno sniženja, a nepoznanice su hidrogeološki parametri. Pokusno crpljenje može imati dva cilja. Prvi se odnosi na testiranje vodonosnog sloja, tj. na određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnog sloja, a drugi se odnosi na testiranje zdenca, tj. određivanje specifičnog kapaciteta zdenca, dozvoljenog sniženja, izbor odgovarajuće crpke, itd. Princip na kojem se temelji pokusno crpljenje sastoji se u tome, što se iz zdenca koji ima filterski dio u vodonosnom sloju koji želimo testirati, crpi voda određenim kapacitetom kroz određeno vrijeme. Učinak crpljenja na potenciometrijsku plohu (piezometarsku visinu) opaža se mjerenjem sniženja u crpljenom zdencu i opažackim bušotinama, tj. piezometrima.

Hidrogeološki parametri vodonosnog sloja izračunavaju se pomoću određenih formula (analitičkih rješenja jednadžbi toka) u koje uvrštavamo poznate i izmjerene veličine: sniženja u piezometrima, udaljenosti piezometara od zdenca i crpnu količinu. Za vrijeme pokusnog crpljenja mjeri se sniženje u vremenu i crpljena količina. Prije početka pokusnog crpljenja potrebno je utvrditi sve postojeće promjene razine podzemne vode, uključujući dugotrajne regionalne trendove i kratkotrajne promjene. Za svaki piezometar izrađuje se nivogram.

Crpljenje počinje kada se ne očekuju veće promjene potencijala za vrijeme trajanja crpljenja. Poželjno je da pokusno crpljenje traje dok se konus depresije ne stabilizira, tj. dok se ne uspostave stacionarni uvjeti [4]

8.2. Laboratorijske metode

Laboratorijskim metodama koeficijent vodopropusnosti se određuje pomoću *permeametera*, za što se koriste neporemećeni ili poremećeni (najčešće kompaktirani) uzorci tla. Za pouzdane rezultate mjerenja potrebno je poduzeti određene mjere kako bi poremećaji u uzorku bili što manji. Izmjerena vrijednost koeficijenta vodopropusnosti općenito predstavlja podatak koji ne samo po načinu testiranja nego po svome smislu ima laboratorijsko mjerilo. Skupina takvih podataka može izravno predočavati raspodjelu propusnosti cijelog vodonosnika.

Pri laboratorijskom određivanju koeficijenta vodopropusnosti uzorci se podvrgavaju toku koji se može odvijati pri *stalnoj razini potencijala* (*permeametar sa stalnim potencijalom*) ili toku s *promjenjivom razinom potencijala* (*permeametar s promjenjivim potencijalom*).

Za dobro propusne materijale ($k > 10^{-5}$ m/s) koristi se permeametar sa stalnim potencijalom dok se za slabo propusne materijale ($k < 10^{-5}$ m/s) koristi permeametar s promjenjivim potencijalom.

U oba slučaja voda se može dodavati bilo na vrh, bilo na dno uzorka, pa tok može biti silazni ili uzlazni. Uzorak obično ima oblik pravilnoga kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih ploča.

Prije ispitivanja, uzorak mora biti potpuno saturiran vodom i ne smije sadržavati mjehuriće zraka, kako bi se minimizirali njegovi negativni učinci na rezultate mjerenja.

Pri normalnim okolnostima, u vodi postoji određeni sadržaj otopljenog zraka (oko 20 litara po m^3 vode pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku) što ne treba zanemariti kod dugotrajnijih postupaka mjerenja.

Pri laboratorijskome određivanju koeficijenta vodopropusnosti pomoću permeametara, pojavljuju se brojne poteškoće u dobivanju pouzdanih rezultata pa treba voditi računa o slijedećim ograničenjima:

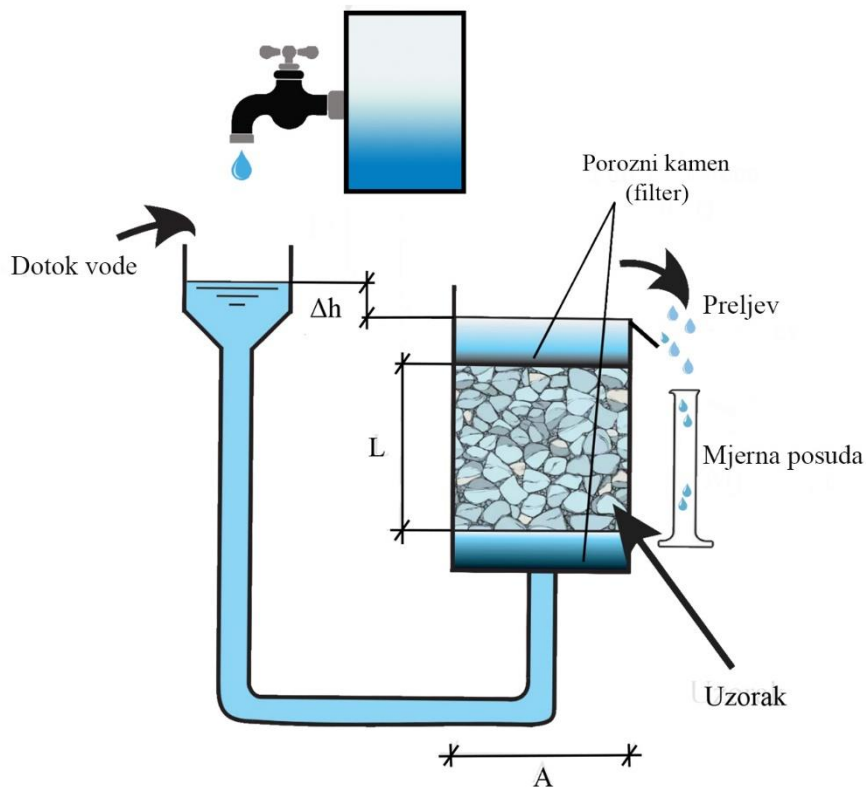
- Tla su u prirodi obično uslojena pa je u laboratoriju teško simulirati stvarne terenske uvjete.
- U pijesku su k_v i k_h dosta različiti, često reda veličine od $k_h = 10k_v$ do $k_h = 1000k_v$, a takvi se prirodni uvjeti pri uzimanju uzoraka nepovratno izgube.
- Male dimenzije terenskih uzoraka dovode do djelovanja rubnih uvjeta, poput tečenja uz glatke strane posude i stvaranja mjehurića zraka u vodi ili u obliku zamki zraka u uzorku, što može imati zamjetan učinak na rezultate.
- Metode mjerenja permeametrom odvijaju se samo u saturiranim uvjetima.
- Kada je k malen, reda veličine 10^{-7} do 10^{-11} m/s, vrijeme potrebno za testiranje lako može uzrokovati evaporaciju i procurivanje opreme, što dovodi do pogreške u veličini hidrauličke vodljivosti k za nekoliko redova veličine.
- Zbog trajanja testa, obično se primjenjuje puno veći hidraulički gradijent nego što je u prirodi.
- U pijesku nerealno visok hidraulički gradijent može stvarati turbulencije, dakle okolnosti toka različite od terenskih pod kojima se odvija laminarni tok.
- Nerealno visok hidraulički gradijent može dovesti do konsolidacije i poroznosti koja je različita od prirodne poroznosti uzorka [13].

8.2.1. Permeametar sa stalnim potencijalom

U permeametru sa stalnim potencijalom strujanje je ustaljeno i jednodimenzionalno. Uzorak je izložen stalnoj razlici piezometarske razine Δh , koja osigurava stalnu količinu toka Q , mjerljivu na donjemu preljevu. Pri takvim uvjetima i uz dužinu uzorka L i površinu presjeka uzorka A , koeficijent vodopropusnosti može se izravno odrediti iz Darcy-jeva zakona. [9]

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h} \quad (27)$$

Shema permeametra sa stalnim potencijalom prikazana je na slici 8.



Slika 8. Shema permeametra sa stalnim potencijalom

Oznake na slici su :

- A – poprečni presjek uzorka
- L – duljina uzorka
- Δh – razlika hidrauličkih potencijala

8.2.2. Permeametar s promjenjivim potencijalom

Permeametar s promjenjivim potencijalom (Slika 9.) posebno je prikladan za određivanje hidrauličke vodljivosti sitnozrnatih materijala. Tu se količina protjecanja vode kroz uzorak određuje opažanjem iznosa pada visine vode u uspravnoj cijevi. Tijekom nekog vremena t , visina vode opadne s njezine inicijalne visine h_1 na h_2 . [9]

Prema Darcy-evu zakonu je $v = k \cdot i$, a $i = \frac{\Delta h}{L}$, pa je:

$$Q = A \cdot v \cdot dt = A \cdot \frac{h}{L} \cdot k \cdot dt = a \cdot dh \quad (28)$$

Iz toga se dobiva diferencijalna jednačba:

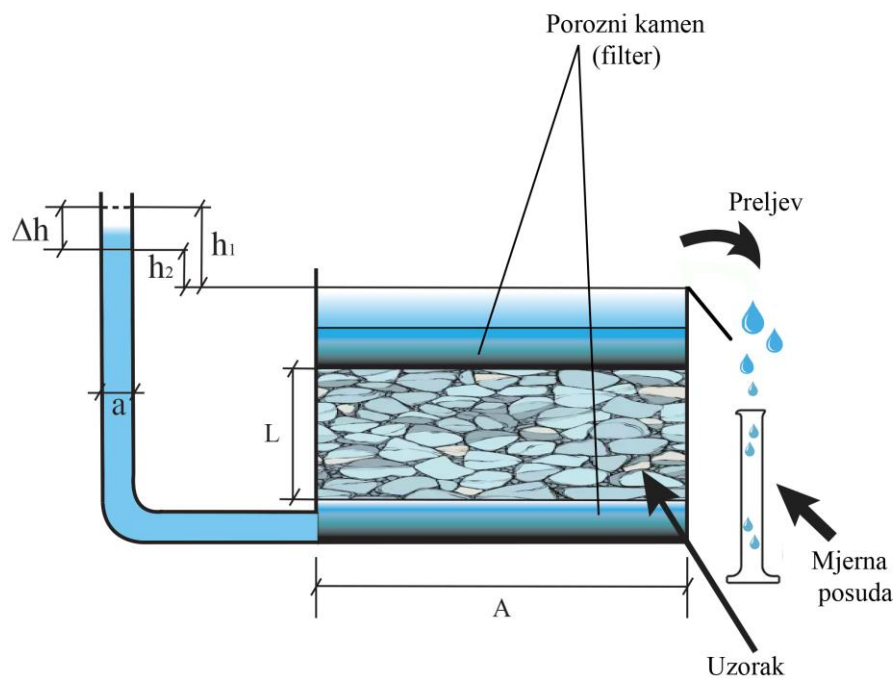
$$\frac{dh}{h} = k \cdot \frac{A}{a \cdot L} dt \quad (29)$$

kojoj je rješenje:

$$\ln h = k \cdot t \cdot \frac{A}{a \cdot L} \quad (30)$$

Na početku i na kraju vremenskog intervala (Δt) mjeri se visina vode u cijevima (h_1, h_2), pa se uvrštavanjem dobiva:

$$k = 2,3 \cdot \frac{L \cdot a}{A \cdot \Delta t} \cdot \log \frac{h_1}{h_2} \quad (31)$$



Slika 9. Shema permeametra s promjenjivim potencijalom

Oznake na slici su:

A – poprečni presjek uzorka

L – duljina uzorka

a – poprečni presjek vertikalne cijevi

h_1 – visina vode u vertikalnoj cijevi na početku mjerenja

h_2 – visina vode u vertikalnoj cijevi na kraju mjerenja

Δh – promjena visine vode u vertikalnoj cijevi

9. EMPIRIJSKE METODE ZA PROCJENU KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI

Metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti mogu se grubo podijeliti na izravne i neizravne. U izravne metode ubrajaju se terenska i laboratorijska mjerenja vodopropusnosti dok neizravne metode čine:

- procjena vodopropusnosti na temelju svojstava granulometrijskog sastava tla odnosno statističkih svojstava granulometrijske krivulje
- procjena vodopropusnosti pomoću krivulja primarnog konsolidacijskog slijeganja

Za procjenu koeficijenta vodopropusnosti iz granulometrijskog sastava nekoherentnog tla (šljunak i pijesak), razvijeni su mnogobrojni empirijski postupci. Svi oni se temelje na prethodno opisanim principima, uzimajući u obzir svojstva poroznog medija (tla) kroz koji teče neka tekućina ali i fizikalna svojstva same tekućine. U geotehničkoj praksi ta tekućina je uglavnom voda.

Mnogi autori razvili su empirijske metode samo za određene vrste nekoherentnih tala, uglavnom pijeske, za određeni raspon veličina efektivnih promjera zrna, njihovih oblika i poroznosti.

Za relativno pouzdanu procjenu koeficijenta vodopropusnosti pomoću empirije, neophodno je pravilno odabrati onaj empirijski postupak koji najbolje odgovara svojstvima granulometrijske krivulje čija se propusnost procjenjuje. U praksi se obično koristi nekoliko odgovarajućih postupaka čiji se rezultati mogu uspoređivati pa i statistički obrađivati.

U literaturi [10] se mogu naći empirijski izrazi za procjenu koeficijenta vodopropusnosti mnogih autora kao što su: Hazen, Beyer, Kozeny, Carman, Sauerbrei, Pavcich, Slichter, Terzaghi, Seelheim, Kaubisch, Zamarin, Krüger, USBR, NAVFAC i mnogi drugi.

U ovom završnom radu, za procjenu koeficijenta vodopropusnosti korišteni su oni empirijski izrazi čije su uvjete primjene zadovoljavala svojstva granulometrijskog sastava ispitivanog materijala. To su izrazi prema autorima: Hazen, Beyer, Sauerbrei, Terzaghi, Kozeny-Carman i Seelheim.

Odabrane empirijske metode usklađene su u fizikalnim jedinicama i pri procjeni koeficijenta vodopropusnosti uzimaju u obzir svojstva tekućine odnosno vode na temperaturi 20°C.

Porozitet tla ima značajan utjecaj na njegovu propusnost, ali se sijanjem poremećenih uzoraka nekoherentnih tala ne može izravno odrediti. Da bi se ovaj parametar tla ipak mogao koristiti u nekim empirijskim izrazima, predlaže se (Vuković & Soro, 1992) [10] računanje poroziteta prema izrazu:

$$n = 0,255(1 + 0,83^{C_U}) \quad (32)$$

gdje je C_U koeficijent jednoličnosti, izračunat iz svojstava granulometrijske krivulje.

9.1. Pregled empirijskih izraza za procjenu koeficijenta vodopropusnosti

9.1.1. Hazen

Hazenov izraz [10] je opće poznat i vrlo često se koristi za procjenu koeficijenta vodopropusnosti jednoličnih pijesaka. Uvjeti za njegovu primjenu zavise o karakteristikama granulometrijske krivulje pri čemu mora biti zadovoljeno: $C_U < 5$ i D_{10} između 0,1 mm i 3 mm. Izraz se primjenjuje za pijeske koji sadrže manje od 5% čestica tla manjih od 0,06 mm.

$$k = 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot C \cdot D_{10}^2 \cdot (0,7 + 0,03T) \text{ [cm/s]} \quad (33)$$

gdje je:

$1,16 \cdot 10^{-3}$ – faktor pretvorbe m/dan u cm/s (originalni izraz daje k u m/dan)

C – empirijski koeficijent zavisao o količini gline u pijesku i koji se kreće u širokom rasponu vrijednosti

D_{10} – efektivni promjer zrna u mm

T – temperatura vode u °C

Koeficijent C nije uvijek jednostavno kvantificirati, pa se predlaže računanje njegove vrijednosti prema izrazu Lange-a [10]:

$$C = 400 + 40(n - 26) \quad (34)$$

gdje je n – porozitet u %

9.1.2. Beyer

Beyer je njemački znanstvenik koji je 1964. godine za procjenu koeficijenta vodopropusnosti predložio izraz [10]:

$$k = \beta \cdot D_{10}^2 \quad [\text{m/s}] \quad (35)$$

gdje je:

β – bezdimenzionalni koeficijent koji zavisi o svojstvima tla

D_{10} – efektivni promjer zrna u mm

Koeficijent β računa se prema izrazu:

$$\beta = 4,5 \cdot 10^{-3} \log \left(\frac{500}{C_U} \right) \quad (36)$$

gdje je C_U koeficijent jednoličnosti

Beyer-ov izraz preporuča se za primjenu kod materijala koji imaju efektivni promjer zrna D_{10} između 0,06 i 0,6 mm i koeficijent jednoličnosti C_U između 1 i 20, a odnosi se na temperaturu vode od 10°C. Za svođenje koeficijenta vodopropusnosti na temperaturu 20°C, dobivenu vrijednost treba pomnožiti s temperaturnom korekcijom R_T , koja u ovom slučaju iznosi 1,3. Temperaturna korekcija objašnjena je u poglavlju 10.2.3, izraz (45).

9.1.3 Sauerbrei

Sauerbrei za materijale s promjerima zrna do 0,5 mm predlaže korištenje slijedećeg izraza [10]:

$$k = 3,49 \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \cdot \tau \cdot D_{17}^2 \quad [\text{cm/s}] \quad (37)$$

gdje je

n – porozitet ($n\%/100$)

τ – korekcija zbog temperature koja se očitava iz tablice ili se izračunava

D_{17} – promjer zrna u mm, kod kojih je 17 % zrna u materijalu manje od tog promjera

Temperaturna korekcija τ predstavlja recipročnu vrijednost kinematične viskoznosti vode, koja se može analitički izraziti kao:

$$\tau \sim 1,05 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\theta} \quad (38)$$

Vrijednost τ za temperaturu vode od 20°C iznosi 1,052.

9.1.4. Terzaghi

Terzaghi-jev poluempirijski izraz za procjenu koeficijenta vodopropusnosti može se iskazati na više načina, a ovdje se prikazuje u obliku [10]:

$$k = \frac{\beta}{\mu_T} \left(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 \cdot D_{10}^2 \quad [\text{cm/s}] \quad (39)$$

gdje je:

β – empirijski koeficijent koji zavisi o obliku površine zrna i općenito se kreće u rasponu vrijednosti od 10,48 (za zaobljenu i glatku površinu zrna) do 6,02 (za uglata i hrapava zrna)

μ_T – dinamička viskoznost vode na temperaturi mjerenja T °C u jedinici Poise

n – porozitet u ($n\%/100$)

D_{10} – efektivni promjer zrna u cm

Za procjenu koeficijenta vodopropusnosti ispitivanog pijeska, usvojena je vrijednost empirijskog koeficijenta za zaobljena i glatka zrna, $\beta = 10,48$ i dinamička viskoznost vode na 20°C, $\mu = 1,002 \times 10^{-2}$ Poise

Prema Vuković & Soro (1992) [10], Terzaghi-jev izraz primijenjen za krupni pijesak, daje rezultate bliske onima dobivenim eksperimentalno.

9.1.5. Kozeny-Carman

Kozeny (1927) i Carman (1938, 1956) razvili su djelomično empirijski i djelomično teoretski izraz za procjenu propusnosti poroznih medija [10]. Izraz se temelji na ukupnom granulometrijskom sastavu tla, obliku zrna i poroznosti. Posljedično tomu, praksa pokazuje da ovaj izraz daje bolju procjenu koeficijenta vodopropusnosti od Hazenovog izraza. Postoji više oblika Kozeny-Carman-ovog izraza, a ovdje se daje jedna od modificiranih verzija:

$$k = \left(\frac{\rho \cdot g}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \cdot \left(\frac{D_{10}^2}{180} \right) \quad [\text{m/s}] \quad (40)$$

+gdje je:

ρ – gustoća vode na temperaturi mjerenja u kg/m^3

g – gravitacijsko ubrzanje u m/s^2

μ – dinamička viskoznost vode na temperaturi mjerenja u $\text{mPa}\cdot\text{s}$

n – porotitet u ($n\%/100$)

D_{10} – efektivni promjer zrna u m

9.1.6. Seelheim

Seelheim (1880) je razvio empirijski izraz za određivanje koeficijenta vodopropusnosti, baziran na laboratorijskim mjerenjima vodopropusnosti pijeska, gline i muljevite krede. Izraz ima oblik [14]:

$$k = 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot D_{50}^2 \quad [\text{m/s}] \quad (41)$$

gdje je:

D_{50} – efektivni promjer zrna u mm

Temperaturna korekcija ovog izraza nije definirana, a pretpostavka je da se izraz odnosi na temperaturu vode od 20°C , s obzirom da je baziran na rezultatima laboratorijskih mjerenja.

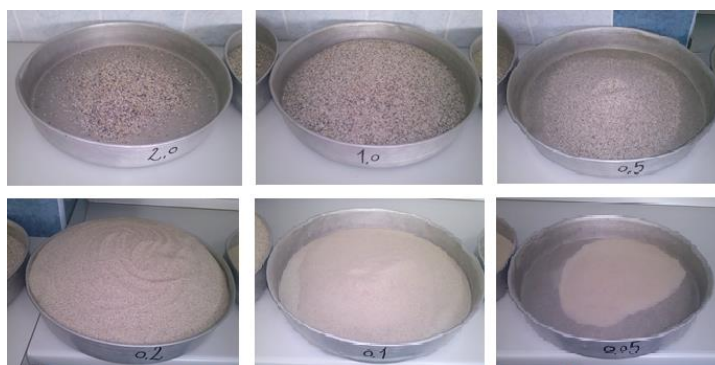
10. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA VODOPROPUSNOSTI U LABORATORIJU

Uzorak za ispitivanje u laboratoriju uzet je na pješčari kod mjesta Jerovec. Tijek provedbe ispitivanja uključivao je određivanje granulometrijskog sastava materijala, određivanje koeficijenta vodopropusnosti u permeamtru sa stalnim potencijalom i pomoću odgovarajućih empirijskih izraza te međusobno uspoređivanje dobivenih rezultata.

Nakon dopreme u laboratorij, uzorak pijeska je rasut u aluminijske kalupe kako bi se osušio. Zbog količine uzorka (približno 30 kg), sušenje je trajalo nekoliko dana na temperaturi 110°C. Nakon toga je slijedilo prosijavanje odnosno granulometrijska analiza.

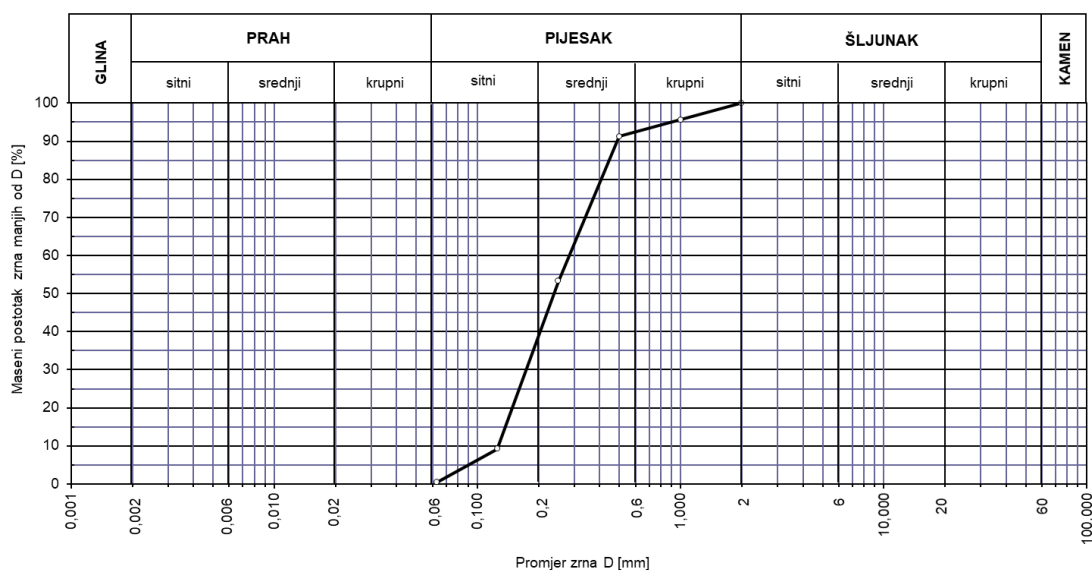
10.1. Granulometrijska analiza

Granulometrijska analiza provedena je prema normi *HRS CEN ISO/TS 17892-4* [15]. Obzirom da se radi o nekoherentnom tlu, korištena je metoda sijanja. Iz ukupne mase materijala prvo je metodom četvrtanja izdvojena količina reprezentativnog uzorka dovoljna za ugradnju u permeametar. Reprezentativni uzorak je zatim sijan. Udjeli pojedinih veličina zrna u ukupnoj masi ispitivanog uzorka prikazani su na slici 10. Obradom rezultata sijanja dobivena je granulometrijska krivulja iz koje je izračunat koeficijent jednoličnosti C_U i određen promjer zrna D_{10} . Dobivene vrijednosti pokazale su da se za određivanje hidrauličke vodljivosti može koristiti raspoloživi permeametar sa stalnom razinom potencijala. Nakon sijanja su sve izdvojene frakcije pijeska međusobno dobro promiješane kako bi se osigurala što bolja homogenost uzorka za daljnja ispitivanja.



Slika 10. Udjeli pojedinih veličina zrna u ukupnoj masi ispitivanog uzorka

Granulometrijska krivulja ispitivanog uzorka pijeska prikazana je na slici 11.



Slika 11. Granulometrijska krivulja ispitivanog uzorka pijeska

Iz granulometrijske krivulje očitani su karakteristični promjeri zrna, a korištenjem izraza (13) i (14) izračunati su koeficijent jednoličnosti i koeficijent zakrivljenosti. Granulometrijski sastav i karakteristična svojstva uzorka prikazana su u tablici 7.

Tablica 7. Granulometrijski sastav i karakteristična svojstva uzorka

Granulometrijski sastav	
Veličina zrna [mm]	Udio u ukupnoj masi materijala [%]
2 – 1	4,37
1 – 0,5	4,40
0,5 – 0,25	38,00
0,25 – 0,125	44,03
0,125 – 0,063	8,77
< 0,063	0,43
Karakteristični promjeri zrna	
D_{10}	0,1266 mm
D_{17}	0,1391 mm
D_{30}	0,1734 mm
D_{50}	0,2376 mm
D_{60}	0,2828 mm
Svojstva granulometrijske krivulje za ocjenu graduiranosti	
C_U	2,23
C_C	0,84
USC klasifikacija	SP

Analizom rezultata sijanja ustanovljeno je da je ispitivani uzorak pijeska pogodan za određivanje koeficijenta vodopropusnosti u permeamtru sa stalnom razinom potencijala jer je najveće zrno u uzorku manje od 1/12 promjera ćelije permeamtra (zahtjev norme ispitivanja), dok efektivno zrno D_{10} i koeficijent jednoličnosti C_U omogućuju primjenu određenih empirijskih metoda za procjenu koeficijenta vodopropusnosti.

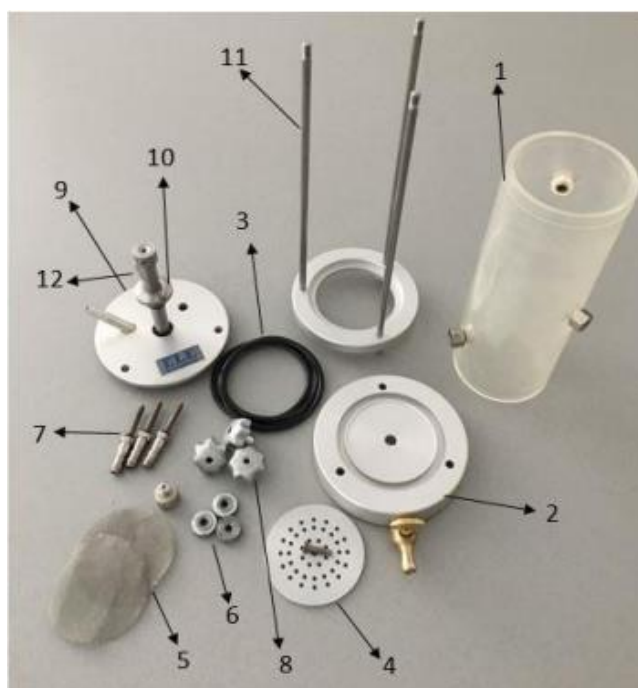
10.2. Određivanje koeficijenta vodopropusnosti u permeamtru sa stalnim potencijalom

Ispitivanje je provedeno prema ispitnoj normi *BS 1377:1990: Part 5-clause 5* [16]. Norma nalaže da se iz uzorka moraju ukloniti sva zrna veća od 1/12 promjera ćelije permeamtra i da u uzorku ne bude više od 10% čestica manjih od 63 μm .

Korišteni permeametar je standardiziranih dimenzija a opremljen je manometarskim cijevima koje tijekom ispitivanja omogućuju kontrolu ujednačenosti protjecanja vode kroz uzorak i mjerenje piezometarske visine stupca vode, kao i sustavom za mijenjanje hidrauličkog gradijenta. Osim mjerenja razlika piezometarske visine za svaku promjenu hidrauličkog gradijenta i duljine uzorka, mjeri se i vrijeme potrebno da kroz uzorak prođe voda odabranog volumena. Dijelovi permeamtra su prikazani na slici 12.

Dijelovi permeamtra:

- 1) plašt ćelije permeamtra,
- 2) donja bazna ploča s ventilom,
- 3) brtve,
- 4) perforirani disk,
- 5) filterske mrežice,
- 6) donje stezne matice,
- 7) manometarske spojnice,
- 8) gornje stezne matice,
- 9) gornja ploča s priključcima,
- 10) potisni klip,
- 11) tronožac za učvršćivanje,
- 12) odzračni ventil



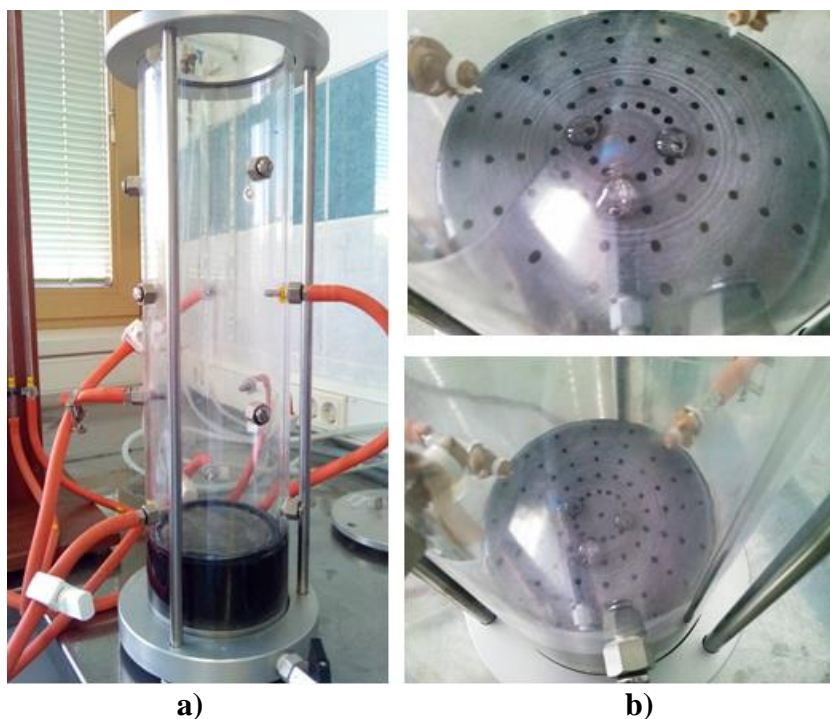
Slika 12. Dijelovi permeamtra [17]

10.2.1. Ugradnja uzorka i priprema za ispitivanje

Prije ugradnje u ćeliju permeametra, potrebna masa suhog uzorka najprije se dobro homogenizira. Da bi se prilikom saturacije izbjegli mjehurići zraka u uzorku i dobila podjednaka gustoća saturiranog uzorka u rahlom stanju, ugradnja uzorka izvedena je pod vodom.

Na donju bazu ćelije prvo se stavlja perforirani disk, porozna ploča i filter mrežica (slika 13.a i 13. b). Nakon toga se kroz donji ventil u ćeliju permeametra lagano pušta voda, pazeći da nema mjehurića zraka. Ćelija se napuni vodom otprilike 2 cm iznad filter mrežice. Zatim se u ćeliju rahlo nasipava pripremljeni uzorak, na način da je razina vode iznad njega uvijek oko 2 cm (slika 14. b). Razina vode održava se polaganim puštanjem kroz ventil na donjoj bazi ćelije. Ćelija se puni uzorkom do željene visine. Nakon toga na uzorak se stavlja filter mrežica, porozna ploča i gornji perforirani disk. Ćelija se zatvara pritezanjem gornje ploče, a pomoću klipa fiksira se položaj gornjeg perforiranog diska koji je preko porozne ploče i filter mrežice u kontaktu s gornjom površinom uzorka.

Poslije ugradnje određuje se srednja visina uzorka, mjerenjem udaljenosti između donjeg i gornjeg žičanog filtra, na najmanje tri mjesta uokolo plašta ćelije permeametra.

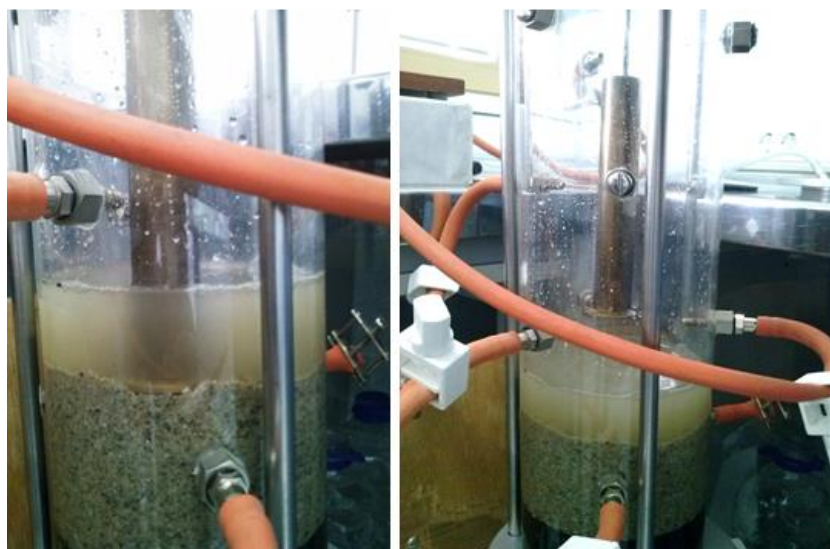


Slika 13. a) Izgled ćelije prije ugradnje uzorka; **b)** Izgled ugrađene porozne ploče

Nakon završene ugradnje uzorka, pristupa se njegovoj saturaciji (slika 14.a). Manometarske cijevi se zatvaraju a na gornjoj ploči otvara se odzračni ventil dok se ćelija vrlo polako uzlazno ne napuni vodom do vrha. Za cijelo vrijeme punjenja, mora se paziti da u vodi i uzorku ne zaostaju mjehurići zraka. Završetkom punjenja ćelije zatvara se ventil na donjoj baznoj ploči.



(a)

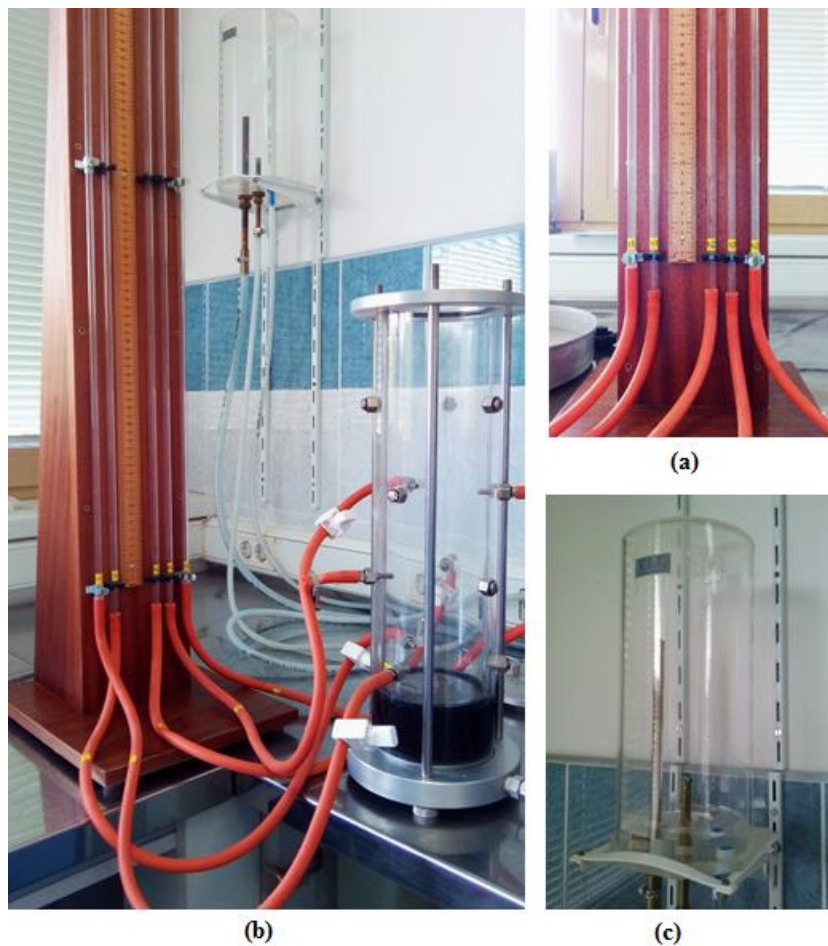


(b)

Slika 14. a) Ćelija s uzorkom za vrijeme saturacije; **b)** Punjenje ćelije uzorkom

Ćelija napunjena sa saturiranim uzorkom spaja se cijevima na preljevni spremnik, podignut na visinu potrebnu za postizanje željenog hidrauličkog gradijenta. Konstrukcija preljevnog spremnika omogućuje održavanje iste razine vode u njemu (slika 15.c).

Iz preljevnog spremnika pušta se voda da polako počinje teći kroz uzorak, stvarajući tako silazni tok vode. Otvaraju se jedna po jedna manometarska cijev i pune se vodom (slika 15.a). Pri tomu se mora paziti da u njima ne zaostanu mjehurići zraka. Poslije nekog vremena, visina vode u njima trebala bi dosegnuti visinu preljevnog spremnika. Nakon toga, permeameterska ćelija spremna je za ispitivanje pod normalnim uvjetima sa silaznim tokom vode. Na slici 15.b) prikazana je ćelija permeametra bez uzorka, spojena na manometarske cijevi i preljevni spremnik.



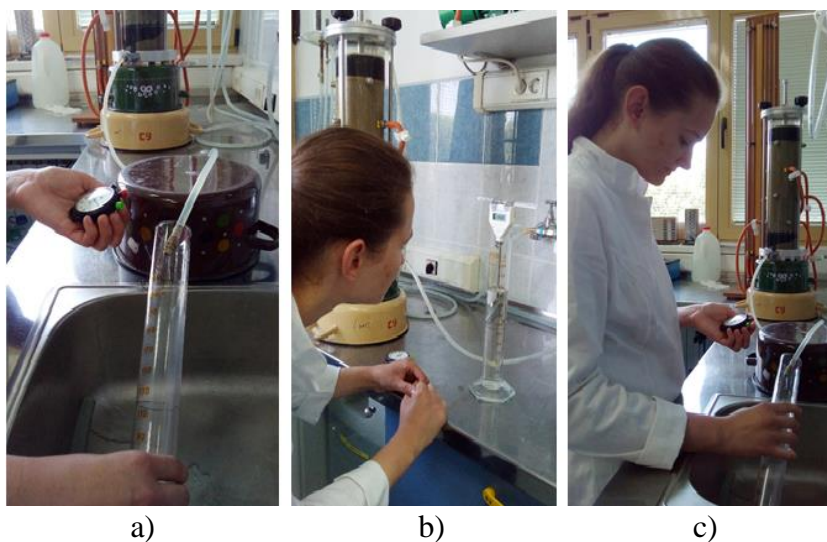
Slika 15. a) Manometarske cijevi; b) Ćelija permeametara spojena sa manometrom i spremnikom za vodu; c) Spremnik za vodu (služi za podešavanje hidrauličkog gradijenta)

10.2.2. Postupak ispitivanja

Postupak ispitivanja započinje otvaranjem ventila na gornjoj i donjoj ploči i puštanjem laganog tečenja vode kroz uzorak. Treba pričekati da se visina vodenog stupca u manometarskim cijevima stabilizira. To ujedno znači da je protok vode kroz cijeli volumen uzorka ujednačen. Ispod ventila na donjoj ploči postavlja se menzura i počinje se mjeriti vrijeme potrebno da određeni volumen vode proteče kroz uzorak. Može se mjeriti i volumen vode koji je protekao kroz uzorak u nekom određenom vremenu. Bilježi se visina vode u manometarskim cijevima kao i temperatura vode u menzuri. Ukoliko visine vodenih stupaca u manometarskim cijevima pokazuju značajnu nejednoličnost hidrauličkog gradijenta, uzorak treba zamijeniti i ugraditi novi. Ispitivanje odnosno mjerenje treba ponoviti nekoliko puta dok se ne dobiju ujednačena očitavanja protoka vode kroz uzorak. Na slikama 16. i 17.a,b,c prikazano je ispitivanje u permeamtru sa stalnim potencijalom i neke faze mjerenja.



Slika 16. Ispitivanje u permeamtru sa stalnim potencijalom



Slika 17. a) mjerenje vremena protoka; b) mjerenje temperature; c) mjerenje volumena

Tijekom ispitivanja hidraulički gradijent mora pokriti područje unutar laminarnog tečenja koje vlada sve dok je omjer između protoka i hidrauličkog gradijenta linearan.

10.2.3. Obrada rezultata mjerenja i računanje koeficijenta vodopropusnosti

Kod pripreme i ugradnje uzorka u ćeliju permeametra izvedena su mjerenja temeljem kojih se mogu izračunati neka fizikalna svojstva uzorka i određene dimenzije same ćelije potrebne za računanje koeficijenta vodopropusnosti. Obradeni rezultati mjerenja prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Dimenzije ćelije permeametra i fizikalna svojstva ugrađenog uzorka

Promjer ćelije permeametra	11,4 cm
Površina poprečnog presjeka ćelije permeametra	102,07 cm ²
Visina uzorka u ćeliji permeametra	33,3 cm
Suha masa ugrađenog uzorka	5250 g
Volumen ugrađenog uzorka	3398,94 cm ³
Suha obujamska gustoća uzorka	1,55 g/cm ³
Gustoća čvrstih čestica uzorka (ispitana)	2,7 g/cm ³
Porozitet ugrađenog uzorka	42,6 %

Suha obujamska gustoća ugrađenog uzorka izračunata je prema izrazu (8), dok je porozitet izračunat prema izrazu:

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad [\%] \quad (42)$$

Koeficijent vodopropusnosti računa se u laboratorijskim uvjetima za temperaturu vode 20°C prema izrazu:

$$k = \frac{Q}{i} \cdot \frac{R_T}{A} \quad [\text{m/s}] \quad (43)$$

gdje je:

k – koeficijent vodopropusnosti

Q – protok vode odnosno volumen vode protekle kroz uzorak u nekom vremenu

i – hidraulički gradijent

R_T – faktor temperaturne korekcije zbog dinamičke viskoznosti vode za korekciju k na referentnu temperaturu laboratorija od 20°C

A – površina poprečnog presjeka uzorka

Hidraulički gradijent i kao i duljina uzorka L računati su između najvišeg i najnižeg manometarskog priključka prema izrazu:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (44)$$

gdje je:

Δh – razlika između dvije visine vodenog stupca u manometarskoj cijevi

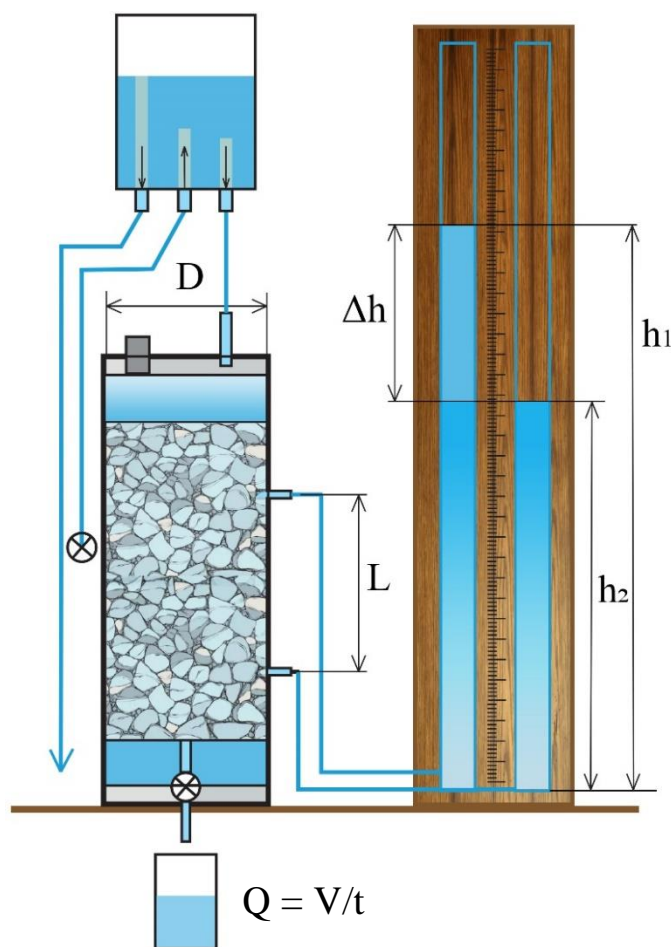
L – duljina između pripadajućih priključaka manometarskih cijevi

Temperaturna korekcija R_T može se procijeniti iz odgovarajućeg grafičkog prikaza ili se računa prema izrazu:

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ C}} \quad (45)$$

gdje je μ_T dinamička viskoznost vode na temperaturi mjerenja a $\mu_{20^\circ C}$ dinamička viskoznost vode na $20^\circ C$.

Shema permeametra sa stalnim potencijalom i odgovarajućim oznakama prikazana je na slici 18.



Slika 18. Shema permeametra sa stalnim potencijalom

Rezultati mjerenja koeficijenta vodopropusnosti u permeamtru prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Rezultati mjerenja koeficijenta vodopropusnosti

Visina vode u manometru [cm]		Δh [cm]	L [cm]	i [1]	V [cm ³]	t [s]	Q [cm ³ /s]	T [°C]	R_T [1]	$k_{20^\circ C}$ [cm/s]
h_1	h_2									
11,4	22,6	11,2	9	1,24	153	60	2,55	23	0,9307	$1,88 \times 10^{-2}$
11,2	22,2	11,0	9	1,22	152	60	2,53	23	0,9307	$1,89 \times 10^{-2}$
10,1	20,5	10,4	9	1,16	143	60	2,38	22	0,9505	$1,91 \times 10^{-2}$
10,6	21,4	10,8	9	1,20	144	60	2,40	22	0,9505	$1,86 \times 10^{-2}$
11,1	21,8	10,7	9	1,19	145	60	2,42	22	0,9505	$1,89 \times 10^{-2}$
11,4	22,0	10,6	9	1,18	143	60	2,38	21	0,9703	$1,92 \times 10^{-2}$

Iz rezultata mjerenja vidljivo je da su protoci vode kroz uzorak kao i hidraulički gradijenti bili ujednačeni, a njihov odnos linearan, što potvrđuje da je tok vode kroz uzorak bio laminarni. Zamjetan je i učinak promjene temperature vode što je protjecala kroz uzorak zbog utjecaja na smanjenje dinamičke viskoznosti vode. Rezultati mjerenja svedeni na referentnu temperaturu od 20°C za laboratorijska ispitivanja dali su ujednačene i bliske vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti, pa se kao konačni rezultat može usvojiti srednja vrijednost svih mjerenja koja iznosi $k_{20^\circ C} = 1,89 \pm 0,03 \times 10^{-2}$ cm/s.

Za praktične potrebe u geomehanici, rezultat koeficijenta vodopropusnosti određen u laboratoriju se obično brojčano iskazuje s jednim cijelim i jednim decimalnim mjestom te pripadajućom eksponencijalnom vrijednosti.

11. PROCJENA KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI POMOĆU EMPIRIJSKIH IZRAZA

U Poglavlju 9. nabrojene su i opisane metode za empirijsku procjenu koeficijenta vodopropusnosti. Odabrani izrazi bili su odgovarajući za procjenu koeficijenta vodopropusnosti ispitivanog pijeska jer su svojstva njegove granulometrijske krivulje zadovoljavala uvjete za primjenu pojedine metode u pogledu veličine efektivnog zrna i koeficijenta jednoličnosti. Koristeći izraze autora: Hazen, Beyer, Sauerbrei, Terzaghi, Kozeny-Carman i Seelheim, izračunati su koeficijenti vodopropusnosti.

Radi usporedbe rezultata, svi su koeficijenti vodopropusnosti korigirani na laboratorijsku referentnu temperaturu vode od 20°C.

Karakteristične veličine zrna koje koriste neki od izraza, određene su iz granulometrijske krivulje ispitivanog pijeska i navedene su u tablici 8.

Porozitet koji se zahtijeva u većini izraza izračunat je prema izrazu (32), također iz svojstava granulometrijskog sastava ispitivanog materijala. Ova vrijednost korištena je u svim empirijskim izrazima za procjenu koeficijenta vodopropusnosti.

Fizikalna svojstva vode kao što su gustoća, dinamička i kinematička viskoznost, te temperaturne korekcije, ako nisu posebno računate, uzimane su iz odgovarajućih tablica u literaturi koja se navodi u ovom Završnom radu.

Računski procijenjene vrijednosti koeficijenata vodopropusnosti iskazane su brojčano s jednim cijelim i jednim decimalnim mjestom te pripadajućim eksponentom, a zbirno su prikazane u tablici 10.

Tablica 10. Zbirni prikaz koeficijenata vodopropusnosti prema empirijskim izrazima

Autor	Koeficijent vodopropusnosti $k_{20^{\circ}\text{C}}$ [cm/s]
Hazen	$2,5 \times 10^{-2}$
Beyer	$2,2 \times 10^{-2}$
Sauerbrei	$1,7 \times 10^{-2}$
Terzaghi	$1,9 \times 10^{-2}$
Kozeny - Carman	$2,1 \times 10^{-2}$
Seelheim	$2,0 \times 10^{-2}$

Budući da empirijski izrazi daju samo procjenu koeficijenta vodopropusnosti jer s u njima ne mogu simulirati svi uvjeti koji utječu na propusnost tla, često se u praksi koristi više odgovarajućih izraza, a za konačnu procjenu usvaja se njihova srednja vrijednost. Iz tablice 10. je vidljivo da su procijenjene vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti prilično konzistentne, a srednja vrijednost iznosi $k_{20^{\circ}\text{C}} = 2,1 \pm 0,04 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$.

12. USPOREDBA VRIJEDNOSTI KOEFICIJENATA VODOPROPUSNOSTI NEKOHERENTNOG TLA DOBIVENIH RAZLIČITIM METODAMA ODREĐIVANJA

Koeficijent vodopropusnosti kao vrlo važan parametar tla, može se odrediti izravnim i neizravnim postupcima. Kad god to okolnosti dozvoljavaju, treba u praksi koristiti izravne metode određivanja, pri čemu je prednost na strani terenskih metoda u odnosu na laboratorijske. Kad izravne metode određivanja iz nekog razloga nisu dostupne ili nisu primjenjive, kao zamjena za procjenu koeficijenta vodopropusnosti mogu se koristiti empirijske metode. Kod toga pažnju treba posvetiti odabiru empirijskih izraza koji moraju biti adekvatni za određeni granulometrijski sastav nekoherentnog tla.

Određivanje koeficijenta vodopropusnosti u laboratorijskim uvjetima ima svojih prednosti ali i mana. One se pažljivom pripremom uzoraka i provedbom ispitivanja mogu minimizirati tako da minimalno utječu na rezultate mjerenja.

U ovom Završnom radu određivan je koeficijent vodopropusnosti pijeska izravnom laboratorijskom metodom u permeamtru sa stalnim potencijalom i zatim uspoređen s procijenjenim koeficijentima vodopropusnosti dobivenim primjenom odgovarajućih empirijskih metoda. Usporedba rezultata prikazana je u tablici 11.

Tablica 11. Usporedba koeficijenata vodopropusnosti

Koeficijent vodopropusnosti određen u permeamtru sa stalnim potencijalom	$k_{20^{\circ}\text{C}} = 1,9 \pm 0,03 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$
Koeficijent vodopropusnosti procijenjen empirijskim metodama	$k_{20^{\circ}\text{C}} = 2,1 \pm 0,04 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Međusobna usporedba koeficijenata vodopropusnosti odnosi se na njihove srednje vrijednosti, dobivene različitim metodama određivanja. Primjetno je dobro podudaranje

rezultata, koje se međusobno razlikuje oko 10 % unutar istog reda veličine. Za praktičnu primjenu u većini geotehničkih zahvata, to je sasvim prihvatljivo odstupanje.

Podudarnost rezultata ostvarena je pravilnim odabirom empirijskih metoda za procjenu koeficijenta vodopropusnosti ali i pažljivom ugradnjom uzorka u ćeliju permeametra. Objasnjeno je da porozitet značajno utječe na propusnost tla pa je mogao imati jak učinak na određivanje vrijednost koeficijenta vodopropusnosti. Da bi fizikalna svojstva pijeska ispitivanog u permeamtru bila što bliža procijenjenim svojstvima u empirijskim izrazima, uzorak se u ćeliju permeametra uspio ugraditi s gotovo istom vrijednosti poroziteta koja je izračunata iz svojstava granulometrijske krivulje pijeska. Tako izračunati porozitet iznosi 42,3 %, dok porozitet ugrađenog pijeska iznosi 42,6 %.

Analizirajući rezultate procjene koeficijenta vodopropusnosti empirijskim metodama, zanimljivo je da je izraz po Terzaghi-ju dao vrijednost koeficijenta vodopropusnosti identičnu onoj iz eksperimentalnog određivanja u permeamtru, dok je izraz prema Hazen-u dao vrijednost koeficijenta vodopropusnosti s najvećim odstupanjem od vrijednosti dobivenoj u permeamtru. Ove činjenice poznate su u praksi od ranije, i navedene su u poglavljima 9.1.4. i 9.1.5. Svejedno, ova podudarnost ne favorizira niti jednu od primijenjenih empirijskih metoda.

13. ZAKLJUČAK

Na uzorku veličine čestica 2 – 0,06 mm (Jerovec) napravljena je granulometrijska analiza te je na istom uzorku laboratorijskim mjerenjem u permeamtru sa stalnim potencijalom određen koeficijent vodopropusnosti. Također su u rezultate ispitivanja uključene empirijske metode, gdje su rezultati vrlo slični laboratorijskim ispitivanjima.

Granulometrijskom analizom izrađena je kumulativna granulometrijska krivulja iz koje su iščitane vrijednosti efektivnih veličina zrna koje služe kao ulazni parametri za određivanje koeficijenta vodopropusnosti empirijskim metodama. Srednja vrijednost koeficijenta vodopropusnosti na temperaturi vode od 20°C iznosi $k_{sr} = 2,1 \times 10^{-2}$ cm/s, dok kod mjerenja permeamtrom sa stalnim potencijalom, srednja vrijednost koeficijenta vodopropusnosti, pri istoj temperaturi vode iznosi $k_{sr} = 1,9 \times 10^{-2}$ cm/s.

Izvođenje ispitivanja u permeamtru je relativno jednostavno što je ujedno i prednost laboratorijskih metoda pred terenskima.

Koeficijent vodopropusnosti ovisi o veličini zrna, koeficijentu pora, viskozitetu vode, obliku zrna i količini zraka u porama.

Metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti na terenu daju točnije rezultate, ali iziskuju puno više vremena, opreme, ljudi i financijskih sredstva. I terenske i laboratorijske metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti imaju svoje prednosti i mane pa na kraju njihov odabir ovisi o iskustvu s prijašnjim mjerenjima, potrebama i financijskim mogućnostima.

14. LITERATURA

- [1] Roje-Bonacci T., *Mehanika tla*. 2. dopunjeno i izmijenjeno izdanje. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, IGH d.d. Zagreb, Geotehnički fakultet: Varaždin; Split 2003.
- [2] Pollak Z., *Hidrogelologija za građevinare*. Poslovna knjiga – Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku; Zagreb 1995.
- [3] Percel B., *Mehanika Tla 1. dio*. Viša Geotehnička škola: Varaždin, RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; Varaždin, ožujka 1975.
- [4] Bačani, A., *Hidrogeologija I*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; 2006.
- [5] Miletić P., Heinrich Miletić M., *Uvod u kvantitativnu hidrogeologiju*. RGN – fakultet Sveučilišta u Zagrebu – OOUR studija geotehnike Varaždin i Nišro Varaždin; Varaždin 1981.
- [6] Roje-Bonacci T., *Zemljani radovi*. Sveučilište u Splitu, fakultet Građevinarstva, Arhitekture i Geodezije; Split 2007.
- [7] Nonveiller E., *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Školska knjiga; Zagreb 1979.
- [8] Žugaj R., *Hidrologija*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb 2000.
- [9] Strelec S., Štuhec D., *Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi*, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011.
- [10] Michael Kasenov, Pd.D., *Determination of hydraulic conductivity from grain size analysis*, Included *Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition*, by Vuković, M., Soro A., Water Resources Publications, LLC, 2010.
- [11] Szavits-Nossan V., *Voda u tlu*. članak, dostupno na:
https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Voda_u_tlu.pdf
- [12] Kvasnička P., Domitrović D., *Mehanika tla*. Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb, 2007. dostupno na:
http://rgn.hr/~pkvasnic/MehanikaTla_2007.pdf

- [13] Urumović. K., *Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb, 2003.
- [14] Vienken, T., Dietrich, P., *Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data*, Journal of Hydrology 400 (2011), pg. 58-71, Elsevier, dostupno na jernal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol
- [15] *HRS CEN ISO/TS 17892-4:2008*, Geotehničko istraživanje i ispitivanje- Laboratorijsko ispitivanje tla – 4. dio: Određivanje granulometrijskog sastava (ISO/TS 17892-4:2004; CEN ISO/TS 17892-4:2004)
- [16] *BS 1377:1990-Part 5*, Method of test for soil for civil engineering purposes, compressibility, permeability and durability tests
- [17] Kevrić K., *Određivanje hidrauličke vodljivosti metodom permeametra sa stalnom razinom na vodocrpilištu Švarča*. diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb 2017.
- [18] Szavits-Nossan V., *Mehanika tla i stijena*, strujanje vode kroz tlo. članak, dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/5._Predavanje_MT.pdf
- [19] Veinović Ž., Kovačević-Zelić B., Kvasnička P., *Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda*. članak, str. 95-102, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol.15 No.1; Prosinac 2003., dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/13393>

15. POPIS SLIKA

Slika 1. Trodjelni sustav tla

Slika 2. Shematski prikaz sijanja

Slika 3. Sita s obzirom na veličinu otvora

Slika 4. Niz sita pričvršćenih na tresalicu

Slika 5. Shematski prikaz vode u tlu

Slika 6. Shematski prikaz Darcy-jeve aparature

Slika 7. Prikaz okvirnih vrijednosti koeficijenta propusnosti k

Slika 8. Shema permeametra sa stalnim potencijalom

Slika 9. Shema permeametra s promjenjivim potencijalom

Slika 10. Udjeli pojedinih veličina zrna u ukupnoj masi ispitivanog uzorka

Slika 11. Granulometrijska krivulja ispitivanog uzorka pijeska

Slika 12. Dijelovi permeametra

Slika 13. a) Izgled ćelije prije ugradnje uzorka; b) Izgled ugrađene porozne ploče

Slika 14. a) Ćelija s uzorkom za vrijeme saturacije; b) Punjenje ćelije uzorkom

Slika 15. a) Manometarske cijevi; b) Ćelija permeametara spojena sa manometrom i spremnikom za vodu; c) Spremnik za vodu (služi za podešavanje hidrauličkog gradijenta)

Slika 16. Ispitivanje u permeamtru sa stalnim potencijalom

Slika 17. a) mjerenje vremena protoka; b) mjerenje temperature; c) mjerenje volumena

Slika 18. Shema permeametra sa stalnim potencijalom

16. POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela tla prema veličini zrna

Tablica 2. Klasifikacija tla prema promjeru zrna prema MIT-u

Tablica 3. Graduiranost krupnozrnatog tla

Tablica 4. Područja pojave vode u tlu

Tablica 5. Prikaz zavisnosti koeficijenta propusnosti k_T na temperaturi T u odnosu na koeficijent propusnosti k_{20} , pri temperaturi od 20°C

Tablica 6. Klasifikacija tla prema propusnosti

Tablica 7. Granulometrijski sastav i karakteristična svojstva uzorka

Tablica 8. Dimenzije ćelije permeametra i fizikalna svojstva ugrađenog uzorka

Tablica 9. Rezultati mjerenja koeficijenta vodopropusnosti

Tablica 10. Zbirni prikaz koeficijenata vodopropusnosti prema empirijskim izrazima

Tablica 11. Usporedba koeficijenata vodopropusnost